

# **Hysteresismessungen an Partikelschäumen: Erstellung eines Modells zur Simulation der Mitteldehnung bei dynamischer Ermüdung**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
der Universität Bayreuth  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von  
*M. Sc. Jan-Hendrik Keller*  
aus  
*Emden*

Erstgutachter:	Professor Dr.-Ing. Volker Altstädt
Zweitgutachter:	Professor Dr.-Ing. Maik Gude
Tag der mündlichen Prüfung:	09.12.2019

Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe  
Universität Bayreuth  
2019

## Kurzfassung

Partikelschäume bestehen aus vielen miteinander verschweißten Schaumpartikeln. Der Vorteil von Partikelschäumen ist, dass vergleichsweise einfach leichte Formteile mit äußerst komplexer Geometrie hergestellt werden können. Die Dichte der Formteile kann in einem breiten Bereich variiert werden, wodurch die mechanischen Eigenschaften der Formteile an die jeweilige Anwendung spezifisch angepasst werden können.

Expandiertes **Polypropylen** (EPP) als teilkristalliner Partikelschaum und **expandierbares Polystyrol** (EPS) als amorpher Partikelschaum haben zurzeit für Konstruktionsanwendungen die größte Bedeutung und werden in der Praxis häufig statisch belastet. Partikelschäume drängen aber zunehmend in Anwendungsbereiche vor, in denen dynamische Belastungssituationen über einen langen Zeitraum herrschen. Anwendungsbeispiele aus dem Bereich des Autobaus sind Pralldämpfer, Dachholme und Armlehnen aus EPP.

Die besondere Morphologie der Partikelschäume stellt bei der Vorhersage der mechanischen Eigenschaften von daraus hergestellten Formteilen bei dynamischer Belastung eine Herausforderung dar. Formteile bestehen aus einem komplexen Netzwerk von verschweißten Partikeln und Hohlräumen (sog. Zwickeln). Die mechanischen Eigenschaften des Formteils werden von den individuellen Eigenschaften der Schaumpartikel aber auch maßgeblich durch die Verschweißung der Partikel bestimmt. Individuelle Schaumpartikel bestehen aus Zellstegen und Zellwänden, welche unter dynamischer Belastung ausknicken, sich verbiegen oder brechen können. Eingeschlossenes Zellgas beeinflusst dabei zusätzlich die Steifigkeit der Partikelschäume in Abhängigkeit vom Deformationsgrad sowie von der Belastungsgeschwindigkeit.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, für EPS und EPP bei gleicher Dichte von  $30 \text{ kg/m}^3$

- Kennlinienveränderungen bei dynamischer Belastung unterschiedlicher Mittelspannung und Amplitude mittels Hysteresismessungen differenziert zu erfassen,
- auftretende Veränderungen in der Mitteldehnung mittels generalisierter Kelvin-Voigt-Modelle phänomenologisch zu beschreiben.

## Short Summary

Bead foams consist of many foamed beads welded together. One advantage of bead foams is that it is comparatively simple to produce light weight parts with complex geometry. The density of these parts can be varied within a wide range, whereby the mechanical properties can be specifically adapted to the particular application.

Expanded polypropylene (EPP), as a partially crystalline bead foam, and expandable polystyrene (EPS), as an amorphous bead foam, are currently the most important construction materials and are often subjected to static loads. Bead foams, however, are increasingly pressing for application areas where dynamic stress situations prevail over a long period of time. Examples are shock absorbers, roof rails and arm rests made from EPP in the car.

The particular morphology of the bead foam is a challenge for the prediction of the mechanical properties under dynamic load. Bead foams consist of a complex network of welded beads and cavities (so-called gussels). The mechanical properties of the molded part are also determined by the individual properties of the foamed beads but also by the welding of the beads. Individual beads consist of cell walls and struts that can buckle, bend or even break under dynamic loading. Enclosed gas thereby also influences the stiffness of the bead as a function of the degree of deformation as well as the deformation rate.

The aim of this work is for EPS and EPP with the same density of  $30 \text{ kg/m}^3$

- acquisition of the hysteresis curves under fatigue loading with varying mid-stresses and amplitudes,
- finding of suitable phenomenological models for the prediction of the changes in the midstrain.

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2013 bis 2017 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Professor Dr.-Ing. Volker Altstädt am Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe an der Universität Bayreuth.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Volker Altstädt für die Betreuung dieser Arbeit, für seine Unterstützung und für die Möglichkeit, das Themengebiet der Hysteresismessungen an seinem Lehrstuhl weiterentwickeln zu können. Weiterhin danke ich Herrn Professor Maik Gude für seine hilfreichen Anregungen und für die Übernahme des Korreferats.

Allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Polymere Werkstoffe, insbesondere Anne Lang, Ute Kuhn, Alexander Brücker und Andreas Mainz danke ich für die Unterstützung und die konstruktiven Anregungen im Rahmen der praktischen Arbeiten. Den Kollegen Simone Patermann, Sandra Balzereit, Vitaliy Demchuk und Sven Altstädt gilt mein besonderer Dank für zahlreiche Diskussionen am Dienstort Hamburg. Theresa Adelhardt, Kerstin Mosig und Milena Spörl danke ich für die Unterstützung in administrativen Fragen.

Für zahlreiche Diskussionen rund um das Thema Hysteresismessungen und Schwingungsanalyse gilt mein besonderer Dank Dr. Herbert Mucha, Dr. Horst Deckmann und Herbert Halm.

Mein Dank gilt auch allen Studenten, die zu den erzielten Ergebnissen beigetragen haben. Dies sind namentlich Andreas Frank, Yu Zhong, Jan-Felix Wendel, Jonas Riesner und Michael Rohder.

Meiner Frau Marianna, unseren Töchtern Viktoria und Jasmin und meinen Eltern gebührt der größte Dank für ihre besondere Unterstützung, ihr Verständnis und für den Verzicht auf viel gemeinsame Zeit.

Göttingen, im April 2019

Jan-Hendrik Keller



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>I</b>
<b>Short Summary</b> .....	<b>II</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Wiederkehrende Abkürzungen</b> .....	<b>VI</b>
<b>Formelzeichen</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Einführung und Motivation</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b> .....	<b>4</b>
2.1 Partikelschäume.....	4
2.1.1 Kriechbelastung.....	12
2.1.2 Quasi-statische Druckbelastung .....	17
2.2 Viskoelastische Modellvorstellungen.....	24
2.2.1 Viskoelastizität .....	24
2.2.2 Grundelemente zur Modellierung der Viskoelastizität.....	24
2.2.3 Modellierung der allgemeinen Viskoelastizität.....	27
2.2.4 Schwingendes viskoelastisches Werkstoffverhalten .....	28
2.3 Hysteresismessungen.....	30
<b>3 Zielsetzung und Struktur der Arbeit</b> .....	<b>34</b>
<b>4 Materialien</b> .....	<b>36</b>
<b>5 Methoden</b> .....	<b>37</b>
5.1 Morphologie .....	37
5.2 Probenhalter.....	37
5.3 Quasi-statische Druckeigenschaften.....	38
5.3.1 Einfluss der Geometrie.....	38
5.3.2 Einfluss der Prüfgeschwindigkeit.....	39
5.3.3 Druckverformungsrest.....	39
5.3.4 Mehrfache Druckbelastung .....	40
5.4 Dynamische Hysteresismessungen.....	41
5.4.1 Dynamische Ermüdung bei festem R-Verhältnis .....	44
5.4.2 Mitteldehnung von EPS30 als Funktion der Mittelspannung.....	44
5.4.3 Mitteldehnung von EPS30 als Funktion der Spannungsamplitude .....	46
5.4.4 Mitteldehnung von EPP30 als Funktion der Mittelspannung.....	46

---

5.4.5	Mitteldehnung von EPP30 als Funktion der Spannungsamplitude .....	47
5.4.6	Mittenkurvenverfahren nach Lazan.....	48
5.5	Modellierung des dynamischen Kriechens .....	51
<b>6</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>52</b>
6.1	Morphologie .....	52
6.1.1	Zusammenfassung .....	54
6.2	5-fach Prüfstempel.....	55
6.2.1	Zusammenfassung .....	58
6.3	Quasi-statische Druckeigenschaften.....	59
6.3.1	Einfluss der Probenanzahl .....	59
6.3.2	Einfluss der Probengeometrie.....	60
6.3.3	Einfluss der Prüfgeschwindigkeit.....	63
6.3.4	Druckverformungsrest.....	67
6.3.5	Zyklische Belastung ohne Belastungspause .....	69
6.3.6	Zusammenfassung .....	76
6.4	Hysteresismessungen.....	76
6.4.1	Hysteresismessungen bei konstantem R-Verhältnis.....	77
6.4.2	Dynamische Ermüdung von EPS30 .....	85
6.4.3	Dynamische Ermüdung von EPP30 .....	89
6.4.4	Übergang von Kriechmodus I nach II .....	92
6.4.5	Zusammenfassung .....	95
6.5	Modellierung des dynamischen Kriechens .....	97
6.5.1	Generalisierter Kelvin-Voigt-Ansatz.....	97
6.5.2	Einfluss der Messdatenmenge auf die Modellgenauigkeit.....	99
6.5.3	Physikalische Bedeutung der identifizierten Modell-Elemente .....	102
6.5.4	Modellierung der Mitteldehnung.....	104
6.5.5	Erweiterung des phänomenologischen Modells .....	106
6.5.6	Zusammenfassung .....	110
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>111</b>
7.1	Zusammenfassung .....	111
7.2	Ausblick.....	113
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>115</b>
<b>9</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>119</b>
<b>10</b>	<b>Anhang A: Auswerteroutine in Matlab .....</b>	<b>122</b>
	<b>Publikationen.....</b>	<b>125</b>

## Wiederkehrende Abkürzungen

$\mu\text{m}$	Mikrometer
$\text{CO}_2$	Kohlenstoffdioxid
EPE	Expandiertes Polyethylen
EPEBA	Expandiertes Polyetherblockpolyamid
EPP	Expandiertes Polypropylen
EPS	Expandierbares Polystyrol
ETPU	Expandierbares thermoplastisches Polyurethan
$F_0$	Kraft zum Zeitpunkt 0
Hz	Hertz = Schwingungen pro Sekunde
$\text{kg/m}^3$	Dichte = Kilogramm pro Kubikmeter
kPa	Kilopascal
ms	Millisekunde
PET	Polyethylenterephthalat
PVC	Polyvinylchlorid
$T_g$	Glasübergangspunkt
$T_k$	Kristallisationspunkt
TSG	Thermoplast-Schaumspritzguss
XPS	Extrudierter Polystyrolschaum

## Formelzeichen

$\varepsilon_{\text{Mitte}}$	Mitteldehnung: Mittlere Verformung in Bezug auf die Ausgangshöhe (in %)
$\sigma_{\text{Mitte}}$	Mittelspannung: Relative Kraft in Bezug auf die Fläche (in MPa, kPa)
$f$	Frequenz
$h$	Stunde
$k$	Federkonstante
$\eta$	Dämpferkonstante
$\tau_M$	Zeitkonstante Maxwell-Körper
$\tau_V$	Zeitkonstante Kelvin-Voigt-Körper
$\pi$	Kreiszahl
$\omega$	Kreisfrequenz
$\phi$	Phasenverschiebung
$t$	Zeit in Sekunden
$T$	Periodendauer

# 1 Einführung und Motivation

Der Leichtbau hat grundsätzlich zum Ziel, tragfähige Strukturen durch besonders leichte Konstruktionsmaterialien zu realisieren. Der Vorteil des Leichtbaus ist, dass weniger Ressourcen eingesetzt und somit auch weniger klimaschädliche CO<sub>2</sub>-Emissionen produziert werden. Die sich ergebende Kostenersparnis motiviert die zum Teil engagierten Leichtbauvorhaben.

Für die Neu- und Weiterentwicklung von immer leichteren Konstruktionsmaterialien lohnt ein Blick in die Natur. Viele Gegenstände in unserem täglichen Umfeld sind bereits der Natur nachempfunden, also bionisch inspiriert [1]. So ist z. B. das effiziente Fliegen mit Flugzeugen möglich, weil die Flügelspitzen von Vögeln als natürliches Vorbild für die sogenannten Winglets an Flugzeugen dienen [2]. Andere praktische Erfindungen, wie z. B. der Klettverschluss, gehen eher auf zufällige Entdeckungen zurück [3].

In der Natur werden besonders tragfähige Strukturen oft aus zellulären Grundeinheiten aufgebaut, bei denen ein Teil des Feststoffes durch ein leichteres Medium ersetzt wird. Beispielsweise seien hier Knochen eines (menschlichen) Skelettes [4] oder der zelluläre Aufbau von Balsaholz [5] angeführt. Über viele Evolutionsschritte andauernd haben sich für den jeweiligen Belastungsfall diese höchst angepassten Strukturen ausgebildet. Knochen und andere zelluläre Materialien sind somit auf hohe mechanische Beanspruchung in Druck, Schub oder Biegung ausgelegt [6]. Folglich erscheint es sinnvoll, künstlich hergestellte zelluläre Materialien gezielt im Leichtbau zu verwenden.

Zelluläre Materialien, im weiteren Verlauf Schäume genannt, können aus unterschiedlichen natürlichen oder künstlichen Materialien aufgebaut sein. Schon genannt wurden Balsaholz, welches bereits als Kernschicht in Rotorblättern von Windkraftträdern eingesetzt wird, und Knochen. Weitere natürlich vorkommende Schäume sind beispielsweise Lavagesteine (z. B. Bimsstein oder Tuff) [7]. Künstlich erzeugte Schäume aus Aluminium finden z. B. bereits Anwendung im Leichtbau [8]. Weiterhin zu nennen sind Glasschäume als Isolationsmaterialien oder als sogenannte Isolationsschüttung [9].

Polymere Schäume bilden eine eigene Klasse und sollen an dieser Stelle besonders beleuchtet werden. Sie lassen sich in der Regel kostengünstig herstellen und gut ur- und umformen. Wird das Polymer erst am Ziel geschäumt (z. B. Bauschaum), können die kompakten Ausgangsstoffe bis zum Einsatzort mit einem geringen Aufwand transportiert werden.

Die Verwendung von Schäumen aus Polymeren bringt im Vergleich zu kompakten Polymeren und Metallschäumen eine weitere Gewichtseinsparung mit. Die Vermeidung von Gewicht und somit auch die Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen findet in unterschiedlichen Bereichen, wie z. B. im Bausektor, im Verkehrswesen und in der Energieerzeugung, Anwendung.

- Im Bausektor haben sich Polymerschäume als Wärmedämmung etabliert. Durch die verbesserte Isolation von Wohn- und Geschäftsgebäuden kann die benötigte Heizmenge bei kalter Witterung direkt eingespart werden [10].
- Im Verkehrswesen (Auto + Flugzeug) bedeutet die Verringerung von Gewicht direkt auch eine Kraftstoffeinsparung. Für das Automobil bedeutet die Einsparung eines Kilogramms Automasse etwa die Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um 0,1 g/km [11].
- Die effiziente Erzeugung von „grünem Strom“ im Windenergiesektor ist ebenfalls nur durch Leichtbau zu erreichen. Damit z. B. Windkraftträder effizienter arbeiten, sind die Rotorblätter besonders leicht. Ihr Kern besteht dabei aus einem geschäumten Polymer (z. B. PVC, PET) bzw. einem natürlichen Schaum (Balsaholz), welcher mit einer kompakten Deckschicht biegesteif verbunden ist.

Grundsätzlich besteht bei zellulären Strukturen ein Teil des Feststoffs aus einem leichteren Medium, in der Regel aus einem (eingeschlossenen) Gas. Die Raumdichten solcher Materialien liegen typischerweise zwischen 15 und 30 kg/m<sup>3</sup> bei Isolationsschäumen und bei 250 – 300 kg/m<sup>3</sup> für andere Strukturelemente [10], abhängig von der Anwendung. Zum Vergleich: Luft etwa hat eine Dichte von 1 kg/m<sup>3</sup> und Wasser von 1000 kg/m<sup>3</sup> bei Normbedingungen.

Expandiertes Polypropylen (EPP) als teilkristalliner Partikelschaum und expandierbares Polystyrol (EPS) als amorpher Partikelschaum haben zurzeit für Konstruktionsanwendungen im Leichtbausektor die größte Bedeutung und werden in der Praxis bisher häufig statisch

belastet. Partikelschäume drängen aber zunehmend in Anwendungsbereiche vor, wo dynamische Belastungssituationen über einen langen Zeitraum herrschen. Beispiele sind etwa im Autobau verwendete Pralldämpfer, Dachholme und Armlehnen aus EPP. Expandiertes thermoplastisches Polyurethan (ETPU) als elastomerer Partikelschaum wird zurzeit für eine Laufsohle eines Sportschuhs verwendet.

Die besondere Morphologie der Partikelschäume stellt bei der Vorhersage der mechanischen Eigenschaften von daraus hergestellten Formteilen bei dynamischer Belastung eine Herausforderung dar. Formteile bestehen aus einem komplexen Netzwerk von verschweißten Partikeln und Hohlräumen (sogenannten Zwickeln). Die mechanischen Eigenschaften des Formteils werden von den individuellen Eigenschaften der Schaumpartikel, aber auch maßgeblich durch die Verschweißung der Partikel bestimmt. Individuelle Schaumpartikel bestehen aus Zellstegen und Zellwänden, welche unter dynamischer Belastung ausknicken, sich verbiegen oder gar brechen können [12]. Eingeschlossenes Zellgas beeinflusst dabei zusätzlich die Steifigkeit der Partikelschäume in Abhängigkeit vom Deformationsgrad sowie von der Belastungsgeschwindigkeit.

Die Motivation für diese Arbeit ist es, erstmals systematisch den Einfluss von veränderlichen Belastungsamplituden auf die Ermüdung von Partikelschäumen aufzudecken und mittels analytischer Modelle zu beschreiben. Durch das entstehende Verständnis soll die Ermittlung der Lebensdauer dynamisch belasteter Partikelschäume in Zukunft deutlich schneller möglich sein als bisher.

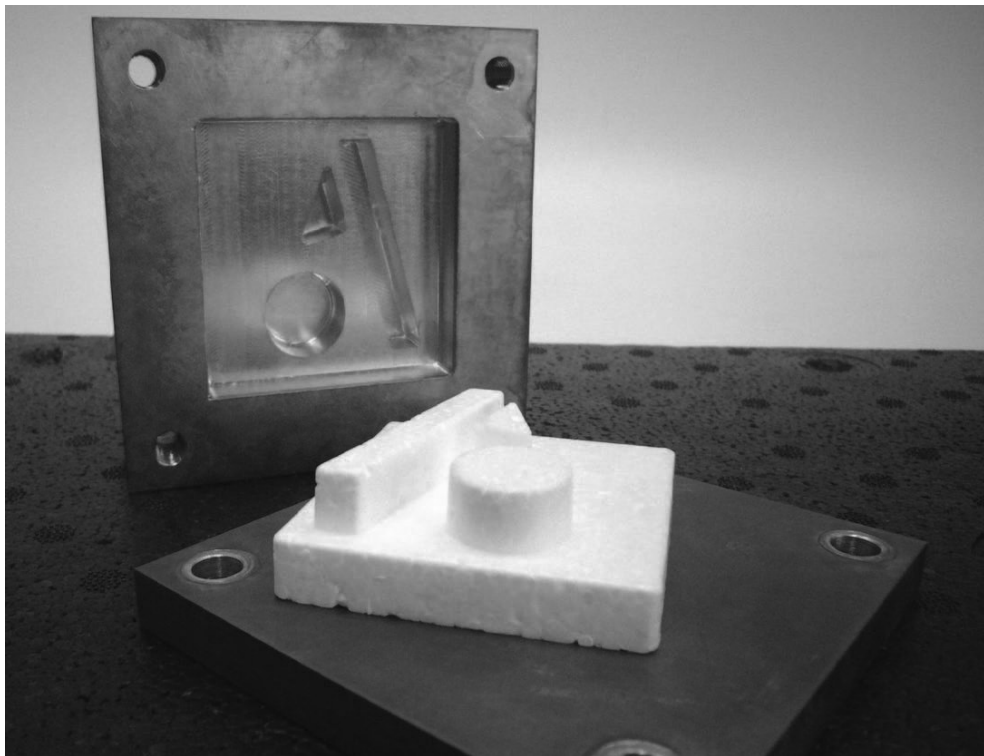
Instrumentierte Hysteresismessungen an einer servo-hydraulischen Prüfmaschine werden durchgeführt und die am Lehrstuhl vorhandene Methode der Mittenkurve wird eingesetzt und erweitert, so dass eine schnellere Charakterisierung der dynamisch-mechanischen Eigenschaften von Prüfkörpern möglich ist. Die analytischen Modelle sollen an zwei unterschiedlichen Materialien (EPS und EPP) gleicher Dichte ( $30 \text{ kg/m}^3$ ) aufgestellt und validiert werden.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

### 2.1 Partikelschäume

Für den Leichtbau eignen sich geschäumte Polymere, die mittels Schaumspritzguss, Autoklavschäumen oder kontinuierlicher Schaumextrusion hergestellt werden. Das Thermoplast-Schaumspritzguss-Verfahren (TSG) wird verwendet zur Herstellung relativ dünnwandiger Bauteile mit bis zu 50 % Gewichtseinsparung [13]. Die kontinuierliche Schaumextrusion hingegen ist besonders geeignet zur Herstellung geschäumter Folien und Profile [14].

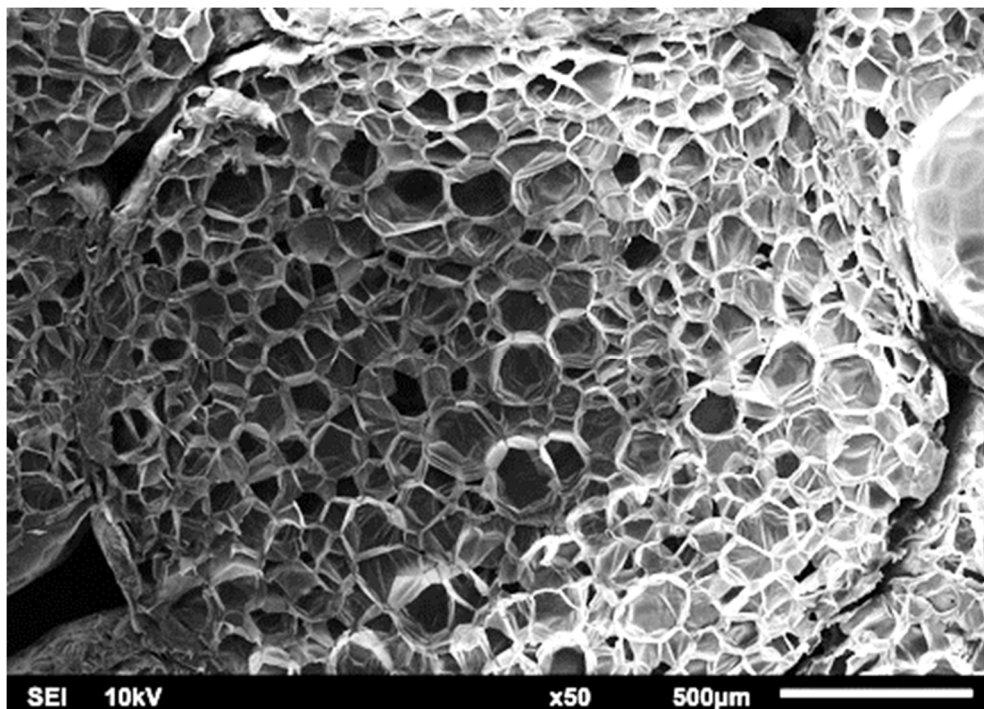
Partikelschäume hingegen bestehen aus vielen einzelnen geschäumten Schaumpartikeln, welche unter Einwirkung von Wärme zu einem Formteil miteinander verschweißt werden [10]. Durch diese Technik ist es möglich, dickwandige Bauteile komplexer Geometrie kostengünstig in einem Produktionsschritt ohne Nachbearbeitung herzustellen [15]. Abbildung 1 zeigt einen Demonstrator des Lehrstuhls aus expandierbarem Polystyrol (EPS).



**Abbildung 1** Demonstrator des Lehrstuhls aus EPS.



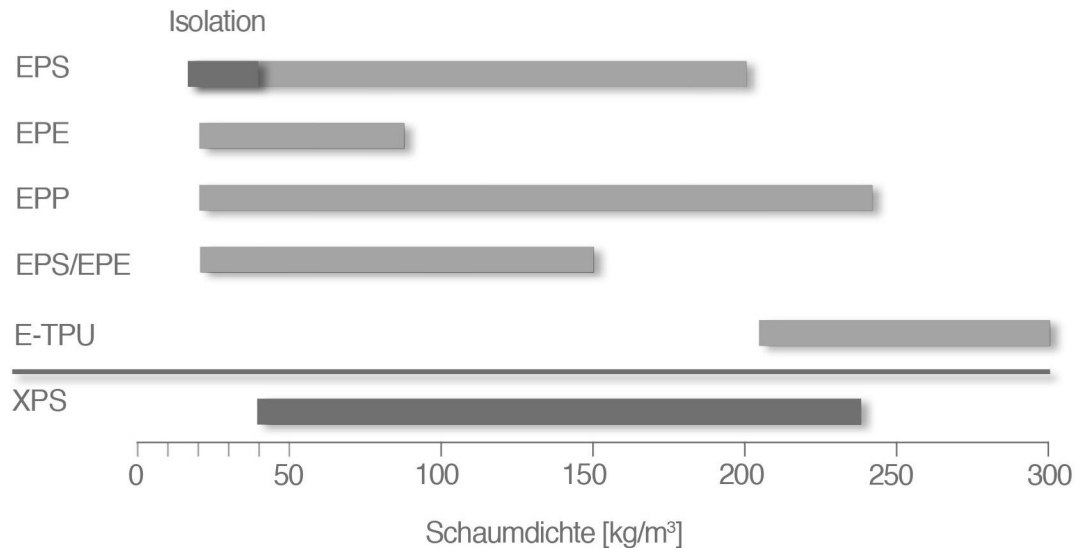
Ausgangsmaterial für Partikelschäume sind von der chemischen Industrie gelieferte Schaumpartikel. Ihre Größe liegt zwischen 1 mm und 6 mm und hängt stark vom Polymer und ihrer Dichte ab. Einzelne Schaumpartikel bestehen wiederum aus einer überwiegend geschlossenen, zellulären Struktur, welche aus Lamellen, Stegen und eingeschlossenem Zellgas aufgebaut ist. Die Zellgrößen innerhalb der Schaumpartikel liegen je nach Dichte im Bereich von 50 µm bis 500 µm. Die Außenhüte der Schaumpartikel bilden eine kompakte Randschicht mit einer Dicke von > 1 µm bis < 200 µm. Die Dicke ist abhängig von den Herstellungsbedingungen, vom Verfahren selbst und der Dichte des Basispolymers. Ein weiteres charakteristisches Morphologiemerkmal der Partikelschäume ist das Zwickelvolumen (Hohlräume) zwischen den verschweißten Schaumpartikeln. Die soeben beschriebene Morphologie ist für ein EPS der Dichte 30 kg/m<sup>3</sup> in Abbildung 2 dargestellt.



**Abbildung 2** Morphologie eines Schaumpartikels aus EPS (Querschnitt aus einer REM-Aufnahme).

Einen Überblick über die am Markt erhältlichen kommerziellen Partikelschäume verschafft Abbildung 3. Die Balken geben den kommerziell zur Verfügung stehenden Dichtebereich an. Die Daten der Formteildichten sind den Datenblättern der Hersteller [16-19] entnommen. Bei EPS ist zu beachten, dass der für Gebäudeisolation verwendete Bereich der Formteile

meist auf 15–30 kg/m<sup>3</sup> beschränkt ist. Zusätzlich wird zur Vergleichbarkeit ein extrudierter Schaum auf Basis von Polystyrol (XPS) gezeigt.



**Abbildung 3** Dichten kommerzieller Partikelschäume im Vergleich zu XPS.

Die spezifischen Eigenschaften der kommerziellen Partikelschäume werden im Folgenden kurz erläutert. Grundsätzlich lassen sich sehr leichte Schäume zur thermischen Isolation empfindlicher Güter einsetzen. Einige Ausgangsmaterialien sind jedoch von elastomerer Natur, so dass der entsprechende Partikelschaum auch für weitere Anwendungen geeignet ist.

- **EPS:** Expandierbares Polystyrol (EPS) wurde in den 1950er Jahren zufällig hergestellt [10]. Es wird beispielsweise von der BASF unter dem Handelsnamen Styropor® vertrieben. Durch die äußerst geringen Dichten und die sehr guten Isolationseigenschaften wird es insbesondere zur Verpackung von thermisch empfindlichen Gütern (z. B. Lebensmitteln, Medikamenten) verwendet. Durch die hohe Drucksteifigkeit eignet sich EPS außerdem als Isolationsmaterial für Gebäudefundamente oder zur Isolation des Mauerwerks. EPS wird in einer etwas höheren Raumdichte von ca. 70 kg/m<sup>3</sup> wegen seiner hohen Energieabsorption auch in Schutzhelmen eingesetzt.
- **Neopor:** Eine Weiterentwicklung des EPS seitens der BASF mit dem Ziel, die thermische Isolationsfähigkeit durch Einarbeitung von feinsten Graphitteilchen zu

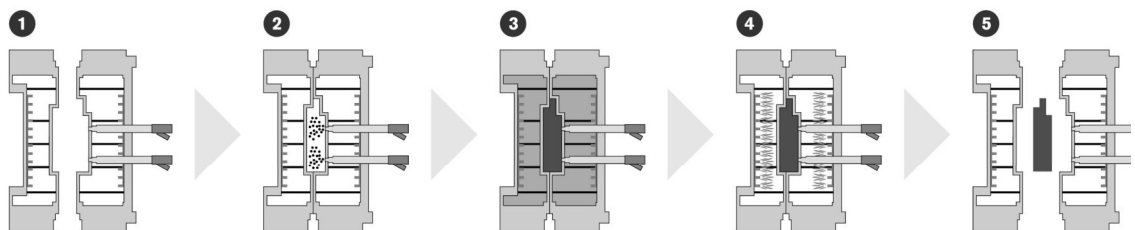
verbessern, mündete schließlich in einer neuen Produktvariante. Neopor besitzt laut Datenblatt aufgrund der geringeren Zellgrößen eine um 20 % verbesserte Dämmleistung gegenüber herkömmlichem EPS [16] bei gleichen mechanischen Eigenschaften.

- **E-Por:** Die Kombination unterschiedlicher Ausgangspolymere bewirkt eine Wechselwirkung zwischen diesen und dem Treibmittel, so dass ein zähelastischer Partikelschaum entsteht. Er ist besonders geeignet für stoßfeste Einwegverpackungen hochwertiger Elektronikartikel [20].
- **Neopolen P:** Es handelt sich um einen auf Polypropylen basierten Partikelschaum (EPP). Eingesetzt wird Neopolen P im Bereich des Fußgängerschutzes im Automobil, in Form von Strukturelementen im Bereich der Mittelkonsole oder der Sitzschale, als Verpackungsträger oder auch zur Isolierung im Apparate- und Komponentenbau. Durch seine hohe Formstabilität, gepaart mit hoher Zähelastizität, ist dieser Werkstoff besonders dafür geeignet [17].
- **Neopolen E:** Neopolen E ist ein auf Polyethylen basierter Partikelschaum (EPE). Eingesetzt wird Neopolen E im Bereich der Verpackung empfindlicher Güter, da er sich durch seine besonders hohe Weichheit von den restlichen Partikelschäumen abhebt. EPE wird nur in Plattenform mit definierten Raumdichten angeboten. Einzelne Partikel sind kommerziell nicht zu beziehen [19].
- **E-TPU:** Expandiertes thermoplastisches Polyurethan (E-TPU) ist eine Entwicklung der BASF aus dem Jahr 2013. E-TPU zeichnet sich durch seine besonders geringe plastische Deformation bei gleichzeitig geringster Dämpfung auch nach vielen tausend Belastungszyklen aus. Außerdem verfügt das Material in einem breiten Temperaturbereich über identische Materialeigenschaften. E-TPU ist daher von -20 °C bis + 60 °C einsatzfähig [18].

Die Schaumpartikel werden vor der Verschweißung zu einem Formteil in einem vorgelagerten Prozessschritt separat hergestellt. Die Herstellung der Schaumpartikel unterscheidet sich je nach Material. Da der Einfluss der Herstellungsbedingungen auf die mechanischen Eigenschaften der Partikelschäume in dieser Arbeit nicht untersucht werden

soll, wird an dieser Stelle lediglich auf folgende Literatur verwiesen, in welcher die grundsätzliche Vorgehensweise der Herstellung unterschiedlichster Schaumpartikel aufgezeigt wird [10].

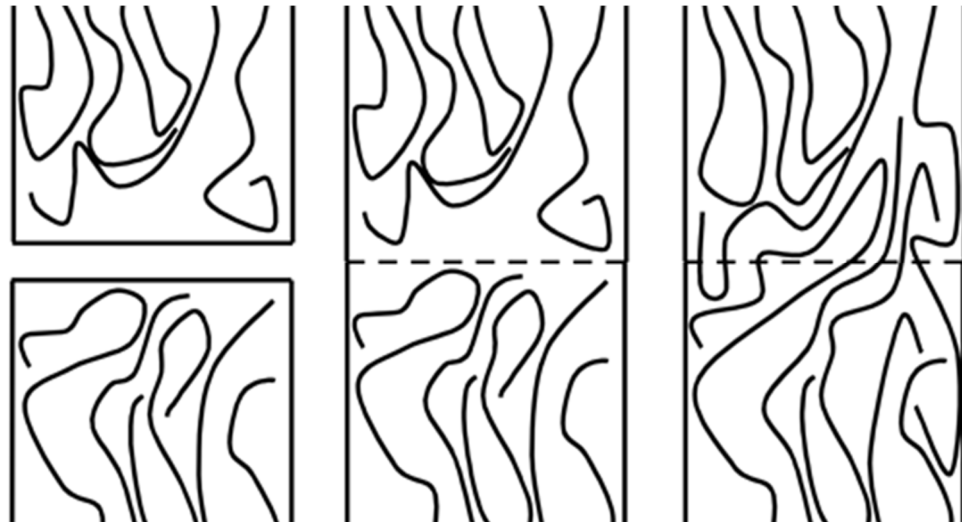
Zur Herstellung von Formteilen wird eine Kavität mit den äußeren Abmaßen der gewünschten Geometrie benötigt (Abbildung 4.1). In diese geschlossene Form werden zunächst expandierte Schaumpartikel lose mittels Druckluft gefördert (Abbildung 4.2). Unter Einwirkung von Energie wird die Beweglichkeit der Polymerketten erhöht (Abbildung 4.3). Die Energie wird hierbei durch heißen und unter Druck stehenden Wasserdampf oder durch Infrarotstrahlung zur Verfügung gestellt. Die oberflächlichen Polymerketten der Schaumpartikel bilden nun untereinander Verschlaufungen aus. Nach dem Abkühlen der Form mittels kalten Wassers entstehen somit feste Verbindungen der Schaumpartikel untereinander und schließlich ein belastbares Formteil (Abbildung 4.4). Nach der Entformung und eventueller Trocknung ist das Bauteil einsatzbereit (Abbildung 4.5). Typische Zykluszeiten für die homogene Verschweißung der Schaumpartikel liegen zwischen 3 und 4 Minuten und hängen maßgeblich von den Bauteildicken des Formteils ab.



**Abbildung 4** Schematischer Ablauf der Formteilherstellung [21].

Bei der Verschweißung der Schaumpartikel miteinander können die oberflächlichen Polymerketten eines Schaumpartikels nun in angrenzende Schaumpartikel diffundieren [22]. Abbildung 5 verdeutlicht den Prozess schematisch. Bei amorphen Partikelschäumen bilden sich Verschlaufungen mit benachbarten Polymerketten, die zu einem festen Zusammenhalt der Schaumpartikel führen. Die teilkristallinen Partikelschäume bilden in der Interdiffusionszone zusätzlich noch Kristallisationszonen aus, die sich in benachbarte Randbereiche ausbilden.

Die physikalische Abgrenzung zwischen zwei benachbarten Schaumpartikeln löst sich idealerweise in der Interdiffusionszone auf und es entsteht eine belastbare Verbindung zwischen sich berührenden Schaumpartikeln.



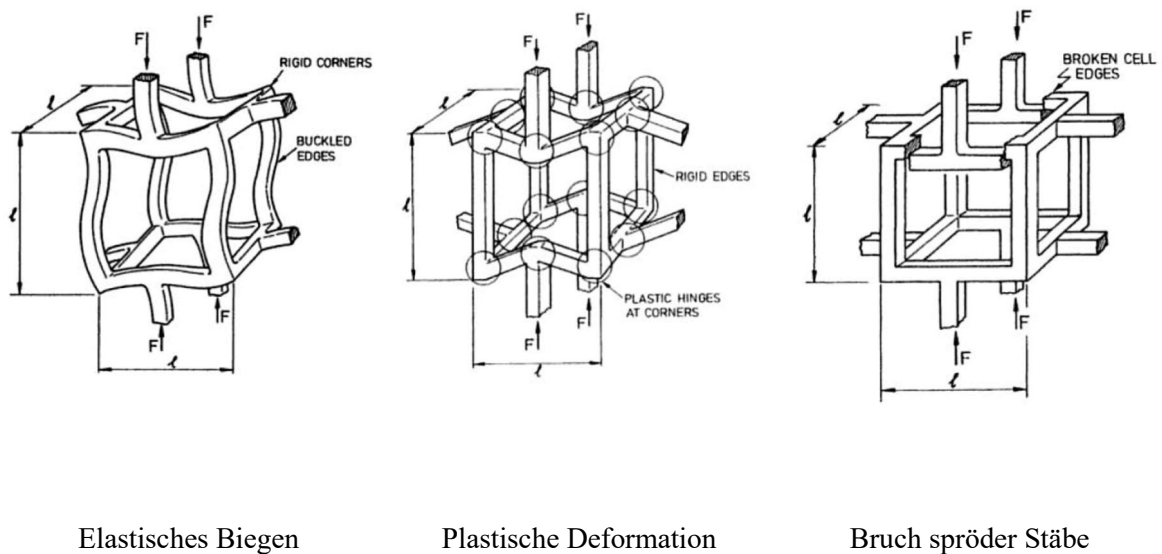
**Abbildung 5** Interdiffusion von Polymerketten zwischen zwei Schaumpartikeln nach [22].

Das korrekte Verschweißen der Schaumpartikel zu einem Formteil beeinflusst die spätere mechanische Beanspruchbarkeit eines Partikelschaums maßgeblich. Bei idealer Verschweißung der Schaumpartikel beginnt das Versagen des Formteils unter Zugbelastung durch das Zerreißen der Schaumpartikel, den sogenannten intra-bead-Bruch. Ist die Verschweißung der Partikel jedoch unzureichend, so lösen sich einzelne Partikel voneinander ab und das Formteil versagt durch inter-bead-Bruch [23].

Neben Zugbelastungen stellen auch Schub- und Biegebelastungen wichtige Belastungsarten im technischen Umfeld dar. Durch den hauptsächlichen Verwendungszweck der Partikelschäume im Leichtbausektor ist aber die Druckbelastung für Partikelschäume von besonderer Wichtigkeit und wird im Folgenden ausschließlich behandelt.

Allgemein bekannt ist, dass die Dämpfung von Schäumen deutlich größer ist als bei kompakten Materialien. Daher werden Schäume oft verwendet, um das Dämpfungsverhalten von schwingend belasteten Bauteilen positiv zu beeinflussen. Dies ist insbesondere beim Sportschuh der Fall, wenn eine genaue Abstimmung der Dämpfung und Energierückgewinnung auf den jeweiligen Anwender nötig ist.

Bedingt durch ihre einzigartige morphologische Struktur, bestehend aus Zellstegen, Lamellen und eingeschlossenem Zellgas, zeigen polymere Schäume ein nichtlineares Kraft-Deformations-Verhalten. Gibson und Ashby [12] unterscheiden mikromechanische Deformationsmechanismen von offen- und geschlossenporigen Schäumen. Demnach lassen sich die auf Zellebene ablaufenden Effekte je nach Grad der Deformation in elastisches Biegen, in plastisches Ausbilden von Gelenken oder in Bruch spröder Stäbe einteilen (sh. Abbildung 6).



**Abbildung 6** Mikromechanische Deformationsphänomene nach Gibson und Ashby [12].

Bei Partikelschäumen kommen neben den Zellstäben, Zellwänden und dem eingeschlossenen Zellgas noch zwei weitere Morphologieelemente hinzu. Dies sind die Haut der Schaumpartikel und die sog. Zwickelvolumina, also Hohlräume zwischen den Schaumpartikeln. Inwieweit die von Gibson und Ashby idealisierten Modelle auf das mechanische Verhalten von Partikelschäumen anwendbar sind, ist in der Literatur bisher nicht ausreichend dargestellt.

Das auf makroskopischer Ebene messbare mechanische Verhalten von EPS- und EPP-basierten Partikelschäumen ist bisher im quasi-statischen Umfeld am besten mittels Spannungs-Dehnungs-Kurven dargestellt. Die lokal auf Zellebene ablaufenden Deformationsmechanismen hingegen und deren Einfluss auf die Formänderung der

Spannungs-Dehnungs-Kurve sind weitestgehend unbekannt. Obwohl es sich bei diesen Materialien um die mengenmäßig am häufigsten eingesetzten Materialien mit der längsten kommerziellen Verfügbarkeit handelt, sind diese Wissenslücken noch offen.

Grundsätzlich hängen die mechanischen Druckeigenschaften von Partikelschäumen sowohl von dem Polymer und der Formteildichte als auch von der Deformationsgeschwindigkeit selbst ab, was im Folgenden erläutert wird. Es ist jedoch festzuhalten, dass diese Materialien nicht durch Bruch versagen, sondern durch zu starke irreversible Deformationen unter (schwingender) Druckbelastung.

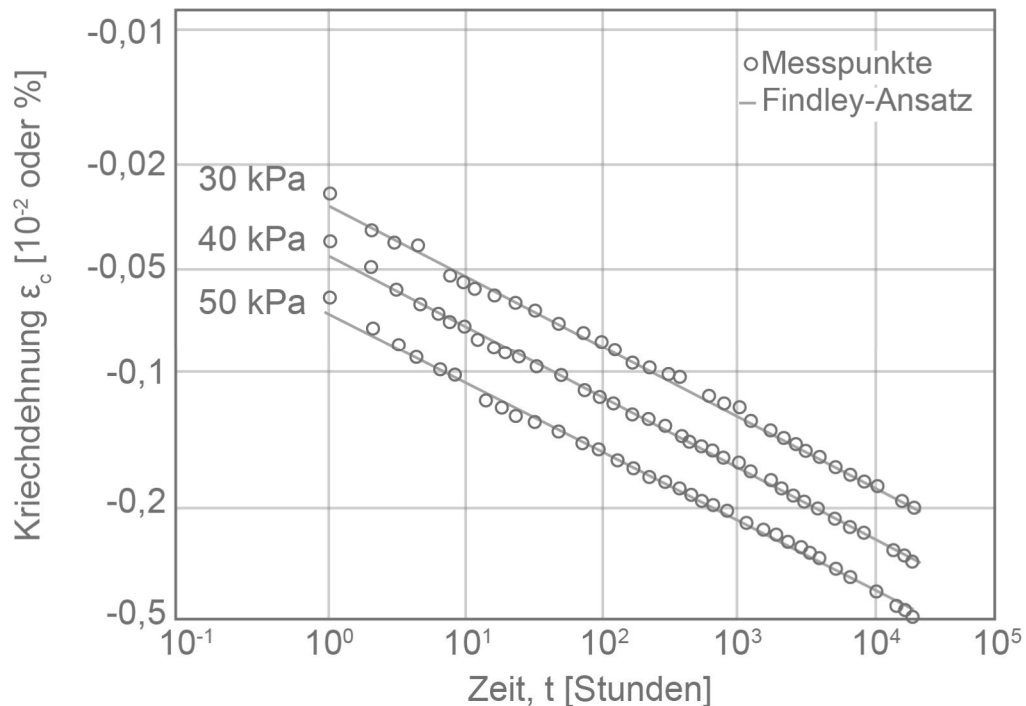
### 2.1.1 Kriechbelastung

Zur Erfassung von Deformationsänderungen unter konstanter Belastung werden Partikelschäume mittels Kriechapparaturen getestet. Hierbei werden Prüfkörper über einen Zeitraum von  $> 10.000 \text{ h}$  ( $> 1,1 \text{ Jahre}$ ) bei konstanten Versuchsbedingungen geprüft.

Die Durchführung erfolgt in einer hierfür geeigneten Apparatur. Zuerst wird eine definierte Belastung auf eine Probe aufgebracht. Diese Kraftgröße bleibt nun über die Dauer des Versuches konstant. Aufgrund der Federsteifigkeit der Polymere ist eine sofortige Längenänderung detektierbar. Beobachtet wird die zeitabhängige Materialveränderung, welche über optische, kapazitive oder induktive Wegaufnehmer bestimmt wird. Aus der Kriechrate wird ersichtlich, wie sich das Material bei zumeist relativ geringen Belastungen über einen großen Prüfzeitraum verhält.

Beispielsweise werden Isolationsschäume aus EPS für Gebäudefundamente mittels Kriechapparaturen geprüft. Arbeiten von Horvath [24] zeigen das Kriechverhalten von EPS mit einer Dichte von  $20 \text{ kg/m}^3$  bei geringsten Belastungen von 30 kPa, 40 kPa und 50 kPa und einen Findley-Modellansatz [25] zur Approximation der gemessenen Kriechkurven (sh. Abbildung 7). Mit Erhöhung der Druckspannung nimmt auch die Verdichtung der Probe bei gleicher Prüfzeit zu (verdeutlicht durch die in Abbildung 7 gezeigten Messpunkte). Die Linien repräsentieren hierbei den Findley-Ansatz. Die Steigung der Regressionsgeraden ist für alle Belastungsfälle identisch. Somit scheint für die gewählte Belastung die zeitabhängige Kriechrate, also die zeitliche Ableitung des Kriechens, nahezu identisch zu sein. Horvath beschränkt sein Modell jedoch auf die statischen Randbedingungen und lässt offen, ob sich die von ihm gezeigten Ansätze aus dem statischen Bereich in die dynamische Prüfung übertragen lassen.





**Abbildung 7** Kriechkurven von EPS mit  $20 \text{ kg/m}^3$  in Abhängigkeit der Druckspannung (in Anlehnung an [24]).

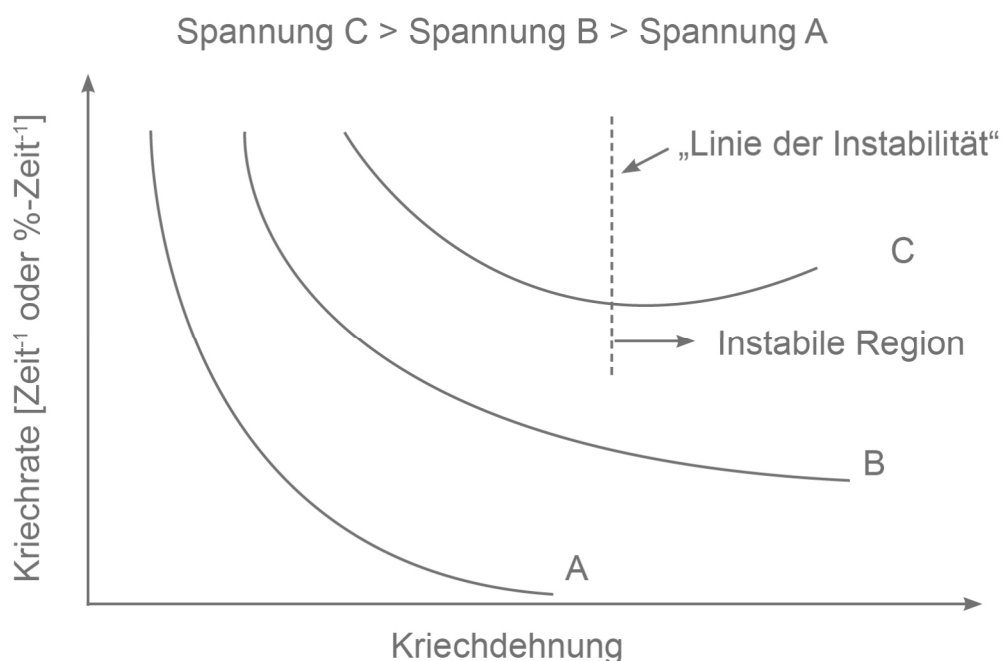
Von besonderer Bedeutung hingegen sind die Aussagen von Horvath [24] über die Einteilung des Kriechens in drei Modi:

- A) Der erste Kriechmodus beschreibt einen zeitlich stabilen Prozess, in dem die Kriechrate (die erste zeitliche Ableitung der Deformation nach der Zeit) mit der Versuchszeit kontinuierlich abnimmt. Das Kriechen ist somit endlich und folglich ist das System stabil.
- B) Im zweiten Kriechmodus zeigt das Material auch eine mit der Zeit abnehmende, jedoch nicht auf null abfallende Kriechrate. Der Kriechprozess bleibt stabil, die Kriechrate nimmt jedoch einen konstanten Wert  $> 0$  an.
- C) Schließlich stellt der dritte Kriechmodus eine gefährliche Lage dar. Die anfänglich abfallende Kriechrate steigt ab einem bisher noch nicht vorhersagbaren Punkt wieder an. Dieses Verhalten wird „tertiäres Kriechen“ genannt. Materialien, deren Kriechrate unter Zug ermittelt wird, versagen an diesem Punkt plötzlich. Um das tertiäre Kriechen hinreichend untersuchen zu können, müssten die Kriechversuche so lang

wie möglich durchgeführt werden. Nur dann ist eine sichere Extrapolation der Messdaten möglich.

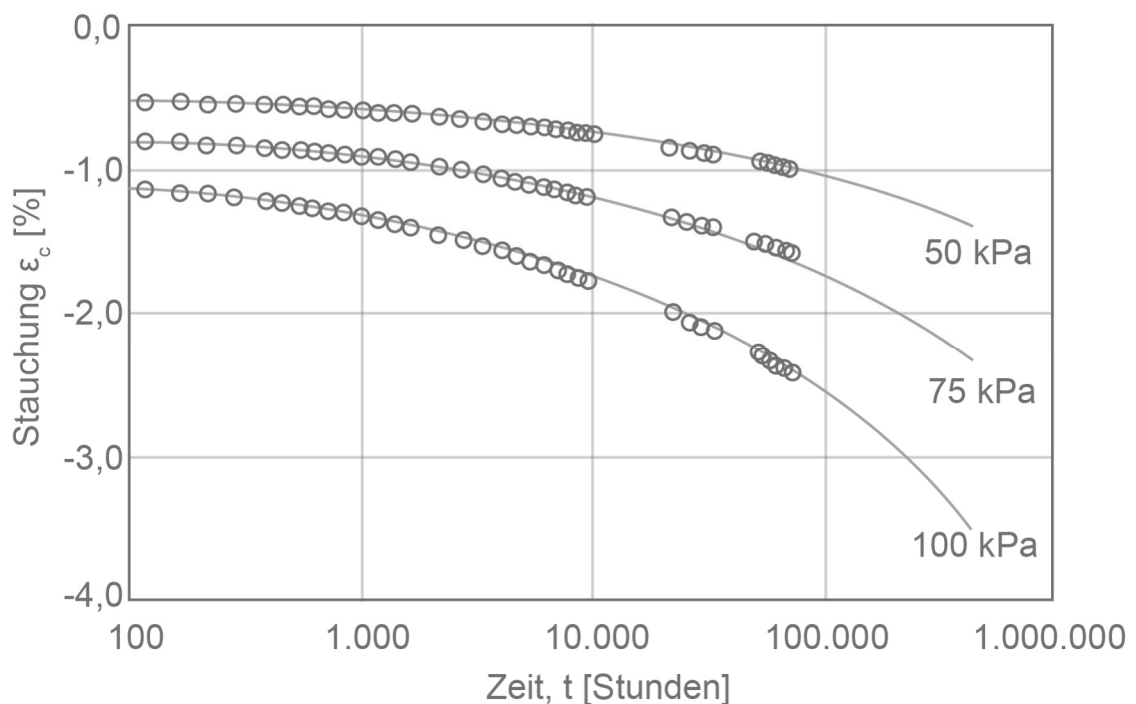
Welche Art des Kriechens auftritt, hängt sowohl von der Höhe der Belastung als auch von der Belastungszeit ab. Die beschriebenen Kriechmodi A, B und C sind in Abbildung 8 in einem sogenannten Sherby-Dorn-Diagramm, welches das Kriechen über die Kriechrate aufträgt, dargestellt [24]. Die Arbeiten von Horvath lassen jedoch offen, wie die Grenze zum tertiären Kriechen systematisch bestimmt werden kann und was schließlich der Auslöser von tertiärem Kriechen ist. Eine mögliche Beschreibung, was in den einzelnen Kriechmodi im Partikelschaum geschieht, liefert z. B. Krollmann [26]. Im Kriechmodus A, der relativ kurz ausfällt, kommt es noch zu keinen Kriecheffekten auf Polymerebene. Die Kriechrate in dem dominierenden Bereich B wird durch das Abgleiten der Polymerketten erklärt. Das tertiäre Kriechen C begründet Krollmann jedoch durch Entschlaufungsprozesse der Makromoleküle, wodurch die Kriechgeschwindigkeit wieder ansteigt.

Ein Modellansatz zur Beschreibung des Kriechens von Partikelschäumen bei dynamischer Ermüdung hingegen fehlt in der Literatur vollständig.



**Abbildung 8** Sherby-Dorn Diagramm zur Illustration der unterschiedlichen Kriechmodi (in Anlehnung an [24]).

Umfassende Untersuchungen von Krollmann [26] an EPS-basiertem Styropor und Peripor zeigen das Kriechverhalten als Funktion der Dichte und der Belastungshöhe. Auch hier findet die analytische Modellierung des Kriechens mittels Findley-Ansatzes statt. Wichtigstes Ergebnis aus diesen Untersuchungen ist, dass ein EPS mit einer Raumdichte von  $34 \text{ kg/m}^3$  selbst bei einer Druckbelastung von  $100 \text{ kPa}$  nach  $10.000 \text{ h}$  nur  $2 \%$  Deformation erfährt (sh. Abbildung 9, oberste Kurve). Die Belastungshöhe ist jedoch willkürlich gewählt. Dennoch erscheint diese Belastungsgröße sinnvoll, um das Material dauerhaft zyklisch auf diesem Niveau zu prüfen, und die Auswirkungen von schwingenden Vorgängen zu untersuchen und mit diesen Kenngrößen zu vergleichen. Weiterhin zeigt Krollmann [26], dass das Kriechen von Peripor deutlich größer ausfallen kann, wenn die Belastung eine gewisse Grenze überschreitet. Leider lässt auch dieser Autor eine sinnvolle Bestimmung dieser Grenze, an der das Kriechen schon frühzeitig in den kritischen Zustand übergeht, offen.



**Abbildung 9** Kriechkurven für EPS  $34 \text{ kg/m}^3$  bei höherer Druckbelastung (in Anlehnung an [26]).

Eine Konditionierung von EPS mittels dieser Kriechversuche scheint nach Krollmann [26] bei erneuter Prüfung zu keiner Veränderung im Material selbst zu führen: Zunächst wurde eine Probe durch 2,8 Jahren Zeitstandsbeanspruchung konditioniert. Anschließend wurde die Probe in eine Universalprüfmaschine gespannt und deren Druckeigenschaften erneut bestimmt und mit den Ausgangswerten verglichen. Hierbei konnten nahezu keine Änderungen der mechanischen Eigenschaften entdeckt werden. Folglich verträgt EPS eine geringe Deformation einmalig und dauerhaft, ohne Schäden zu nehmen. Ein Grenzwert, ab dem jedoch ein Versagen in der Probe nachweisbar wäre, wird nicht angegeben.

Zusammenfassend kann das statische Kriechen von EPS bereits gut mittels Findley-Ansatz analytisch beschrieben werden. Die Höhe der gezeigten Kräfte in den Kriechversuchen hilft das Prüffenster für die dynamische Prüfung einzugrenzen. Aus der Literatur ist bisher nicht bekannt, ob sich diese Ansätze auch auf das Kriechen bei dynamischer Belastung übertragen lassen und ob sich hierzu der Findley-Ansatz zur analytischen Modellierung eignet.

Nachteilig beim Findley-Ansatz ist, dass zur korrekten Beschreibung der Kriechkurve ein Korrekturfaktor  $\beta$  eingeführt werden muss. Dadurch wird die zugehörige Integralfunktion selbst nicht mehr durch elementare Funktionen darstellbar und ist folglich analytisch nicht mehr lösbar [27]. Für diesen Fall schlägt Koczyk in [27] eine numerische Herangehensweise zur Beschreibung des Materialverhaltens vor. Das Einbeziehen aller Morphologiemerkmale in eine numerische Simulation würde nach heutigem Stand der Technik noch immer zu viel Zeit in Anspruch nehmen. Daher ist dieser Ansatz für Partikelschäume zurzeit wenig relevant. Das generalisierte Maxwell- bzw. Kelvin-Voigt-Modell ist daher ein vielversprechender Kandidat, um das dynamische Kriechen phänomenologisch mit relativ wenig Zeitaufwand zu beschreiben. Dies wird in späteren Abschnitten näher erläutert.

### 2.1.2 Quasi-statische Druckbelastung

Im vorherigen Abschnitt wurde das mechanische Verhalten von Partikelschäumen unter sich nicht ändernden Versuchsbedingungen und eine mögliche Modellierung des Kriechens diskutiert. Im folgenden Abschnitt soll das quasi-statische Verhalten als Funktion der Dichte und der Prüfgeschwindigkeit näher erläutert werden.

#### 2.1.2.1 Einfache Druckbelastung

Die Bestimmung der mechanischen Druckeigenschaften unter langsamen, quasi-statischen Deformationsgeschwindigkeiten wird mittels Universalprüfmaschine durchgeführt. Typische Belastungsgeschwindigkeiten für die quasi-statische Prüfung variieren zwischen einigen Millimetern bis zu hundert Millimetern pro Minute (1–100 mm/min). Insbesondere die verformungsabhängigen mechanischen Eigenschaften, wie z. B. Druckmodul, Druckfestigkeit und Druckspannungsfließen, werden so ermittelt.

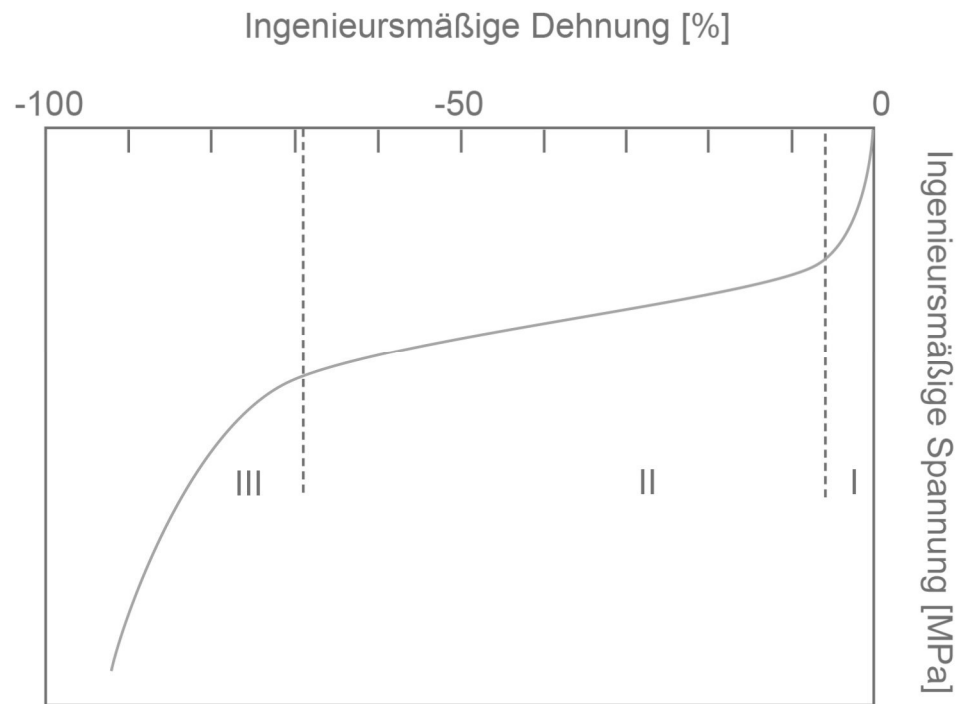
Druckversuche mit einmaliger Verdichtung an Partikelschäumen zeigen stets das in Abbildung 10 gezeigte Verhalten. Die Dehnung ist in diesem Fall in die negative Richtung nach links und die Spannung ebenfalls negativ nach unten aufgetragen, damit der Druckcharakter des gezeigten Versuches deutlich wird. Die an beiden Achsen gespiegelte Form ist in der Literatur ebenfalls zu finden.

Das Deformationsverhalten der Schäume und auch der Partikelschäume lässt sich z. B. nach Gibson und Ashby grundsätzlich in drei Bereiche unterteilen. Eine detaillierte Erklärung liefert z. B. auch Di Landro et al. [28]:

- I. Linearer Bereich: In Bereich I ist lineare Elastizität und der Übergang zum Plateau zu sehen. Zellstege werden elastisch gebogen, das eingeschlossene Zellgas wird komprimiert und Zellwände werden gestreckt. Diese Vorgänge sind (nahezu) vollständig reversibel.
- II. Plateau-Bereich: Ab Bereich II jedoch treten irreversible Deformationsphänomene auf. Plastische Gelenke bilden sich an den Zellwandecken aus, Zellwände reißen und das eingeschlossene Zellgas tritt aus.

Verdichtungs-Bereich: Im Bereich III ist das Material schließlich bereits so weit verdichtet, dass sich gegenüberliegende Zellwände berühren. Der Schaum verhält sich nun immer mehr

wie ein Festkörper. Daher kommt es bei weiterer Verdichtung zu einem starken Anstieg der Kraft-Deformations-Kurve.

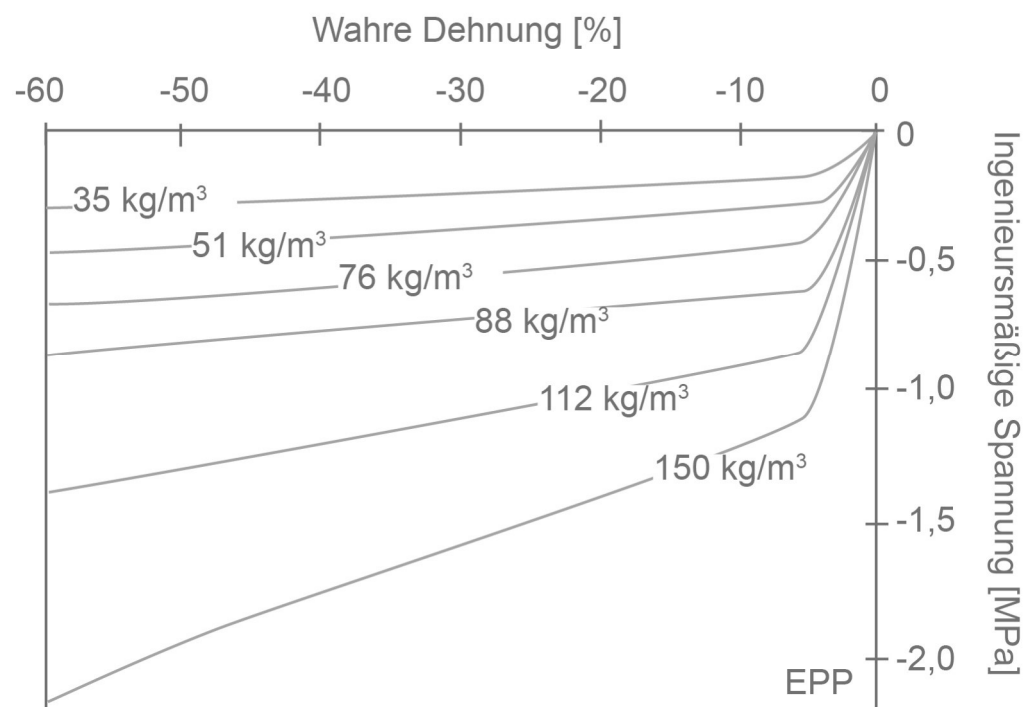


**Abbildung 10** Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Partikelschäumen (in Anlehnung an [28]).

Allgemein bekannt ist, dass mechanische Kenngrößen der Polymere abhängig von der gewählten Belastungsgeschwindigkeit sind. Dies gilt auch für Partikelschäume. Je schneller ein polymerer Partikelschaum belastet wird, desto höher ist auch die Kraftantwort bei gleicher Verformung. Die Unterschiede in der Kraft-Deformationskurve bei veränderlichen Prüfungsgeschwindigkeiten werden mit dem Einfluss des eingeschlossenen Zellgases erklärt [28]. Außerdem ist durch die verringerte Beweglichkeit und den internen Spannungsaufbau der Molekülketten die Zunahme der Steifigkeit zu erklären. Je höher die Belastungsgeschwindigkeit ist, desto geringer ist die Zeit, um die von außen wirkenden Kräfte im gesamten Volumen des Partikelschaums zu verteilen und abzubauen. Dies führt bei Partikelschäumen zu einer frühzeitigen und inhomogenen Streckung von Polymerketten, wodurch diese wie eine steifere Feder wirken.



et al. [29], dass die Kraft bei einer Verdichtung (Dehnung) von 25 % linear mit der Dichte der Schäume zunimmt. Durch die Zunahme der Dichte steigt die Wandstärke der Zellen innerhalb des Schaumpartikels als auch der Haut des Schaumpartikels an, wodurch sich eine natürliche Versteifung ergibt. Die Dehnverfestigung ist bei EPP höherer Dichte stärker ausgeprägt, weil die Trägheitsmomente der dickwandigen Zellen beim dynamischen Biegen größer sind und das eingeschlossene Zellgas in diesen dickwandigen Zellen besser gefangen ist und somit den sogenannten Luftpumpeneffekt besser fördert. Somit weicht das mechanische Verhalten oberhalb von 25 % Verdichtung von dieser linearen Funktion ab. Folglich hat die Gaspermeabilität einen direkten Einfluss auf das mechanische Verhalten. Ein grundsätzliches Verständnis über den Einfluss des eingeschlossenen Gases als Funktion des Umgebungsdrucks besteht noch nicht. Es fehlen noch empirische Untersuchungen zu diesem Umstand.



**Abbildung 12** Einfluss der Dichte auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von EPP bei konstanter Belastungsgeschwindigkeit [29].



### 2.1.2.2 Quasi-statische Laststeigerungsversuche

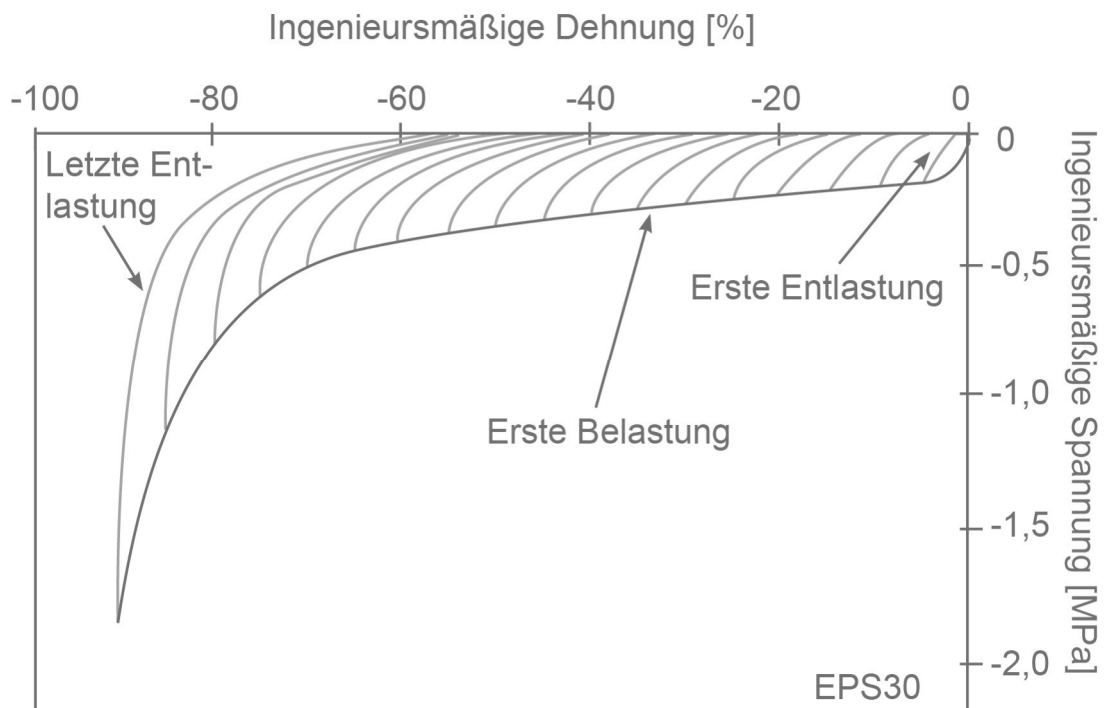
Laststeigerungsversuche eignen sich zur Bestimmung weiterer mechanischer Kennwerte wie beispielsweise dem Relaxationsmodul oder der plastischen Deformation bei stufenweiser Erhöhung der Belastung. Grundsätzlich kann der Laststeigerungsversuch mit oder ohne Entlastungsstufen zwischen einer Erhöhung der Last erfolgen. Je nach Versuchsdurchführung wird dabei die plastische Deformation (mit Entlastung) oder die Relaxation (ohne Entlastung) von Polymeren bestimmt. Laststeigerungsversuche haben den Vorteil, dass innerhalb eines Versuches eine vergleichsweise große Anzahl an Belastungsstufen an einer Probe getestet werden kann. Nachteilig ist, dass keine stationären Zustände erreicht werden, wodurch zeitabhängige Effekte mitunter verschleiert werden.

Öztürk et al. [30] zeigen das zyklische Verhalten von Partikelschäumen auf Basis von EPS im quasi-statischen Laststeigerungsversuch mit Entlastungsstufen. Hierzu wird eine Probe mittels universeller Prüfmaschine um 5 % gestaucht und anschließend entlastet. Direkt nach der Entlastung erfolgt eine weitere, um 5 % höhere Stauchung mit anschließender Entlastung. Dieser Vorgang wird bis zu einer finalen Verdichtung von 90 % durchgeführt. Die so aufgenommenen Spannungs-Dehnungs-Kurven werden zusätzlich mit einer Probe verglichen, die ohne Entlastung direkt auf das finale Niveau verdichtet wurde. In Abbildung 13 werden nur die Belastungskurve der einmaligen Belastung und die Entlastungskurven der jeweiligen Laststufen gezeigt. Öztürk et al. (30) zeigen, dass eine Schädigung des Schaumnetzwerkes durch die Stauchung auf eine gewisse Laststufe hervorgerufen wird. Im weiteren Verlauf des Laststeigerungsversuches scheint diese jedoch keine Auswirkungen auf die weitere Verformung zu haben. Das EPS verhält sich bei erneuter Verdichtung ab Überschreitung des vorherigen Lastniveaus so wie das jungfräuliche, nur einfach belastete EPS. Dieser Effekt wird auch von Krollmann [26] nach statischer Kriechbeanspruchung beschrieben (sh. Seite 16). Eine Arbeitshypothese lautet, dass die Ausbreitung der plastischen Deformation lokal im Probekörper durch eine Überlastung einer einzelnen Struktur ausgelöst wird. Für die dynamische Ermüdungsprüfung bedeutet dies jedoch, dass ein Überschwingen bei der Einregelung zu vermeiden ist.

Aus Abbildung 13 wird weiterhin deutlich, dass EPS zu einer hohen plastischen Deformation nach der Entlastung einer Laststufe neigt. Die plastische Deformation wird durch den Schnittpunkt der Spannungs-Dehnungs-Kurve mit der Abszisse ermittelt.

Die vergleichsweise hohe plastische Deformation nach der Belastung ist bei der späteren Modellfindung von Vorteil, weil EPS sehr sensibel auf Veränderungen in der Belastungshöhe reagiert. Somit kann eine gefundene Modellvorstellung leichter validiert und physikalischen Effekten zugeordnet werden.

Eine detaillierte Darstellung über die im Partikelschaum wirkenden mikromechanischen Deformationsphänomene und den Einfluss der Dichte und des eingeschlossenen Zellgases ist in [12] und [28] zu finden. Welcher dieser Mechanismen jedoch ursächlich für die dynamische Ermüdung ist, ist noch nicht hinreichend erforscht.

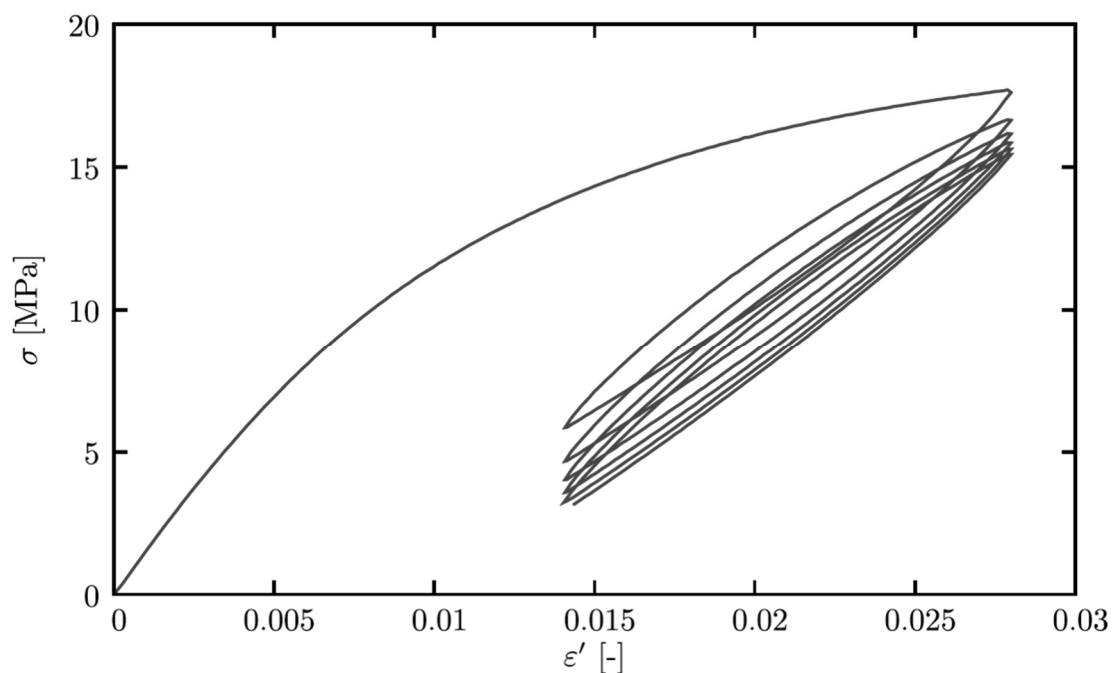


**Abbildung 13** Spannungs-Dehnungs-Verhalten von EPS 30 im Laststeigerungsversuch mit Entlastung auf den Startpunkt [30].

### 2.1.2.3 Quasi-statische Wiederholungsversuche

Bisherige Arbeiten von Guitton et al. an kompaktem Polypropylen zeigen, dass es im Polymer zu einer Art Gewöhnungseffekt kommt, wenn ein Prüfkörper mehrfach hintereinander dieselbe Belastung erfährt [31]. zeigt den Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve

nach Guitton für kompaktes PP bei mehrfacher Be- und Entlastung auf eine konstante Zug-Belastung. Es handelt sich dabei um einen sogenannten dehnungskontrollierten Versuch. Die Lastniveaus werden linear angefahren. Werden nun Spannung und Dehnung in einem Diagramm aufgetragen (Abbildung 14) so ergeben sich typische Hysteresisschleifen. Die Materialerweichung wird durch die Abnahme der Spannung an den Umkehrpunkten der Hysteresisschleifen deutlich, kann aber auch aus dem Spannungs-Diagramm (nicht gezeigt) abgelesen werden. Inwieweit eine solche Konditionierung auch auf Partikelschäume übertragbar ist, ist in der Literatur noch vollständig offen.



**Abbildung 14** Quasi-statisches Ermüdungsverhalten von kompaktem EPP aus [31].

## 2.2 Viskoelastische Modellvorstellungen

Die mikromechanischen Modellvorstellungen von Gibson und Ashby lassen sich aktuell noch in kein Material- oder Stoffgesetz überführen, das für alle Belastungsarten hält. Folglich ist die phänomenologische Modellierung einzelner Kenngrößen als Funktion äußerer Parameter vorzuziehen. Mögliche Ansätze hierfür sind der bisher genannte Findley-Ansatz mit seinen Einschränkungen und die Modellierung mittels eines Ersatzmodells, bestehend aus Federn und Dämpfern. Letzteres wird im weiteren Verlauf bevorzugt, da die Identifikation einzelner Elemente des Modells direkt Rückschlüsse auf das Materialverhalten zulässt.

### 2.2.1 Viskoelastizität

Wenn ein polymerer Werkstoff durch Belastung deformiert wird, so kann nach der Entlastung einer der drei unten genannten Fälle eintreten:

- **Elastisch:** Nach der Entlastung kehrt der Werkstoff sofort in seine ursprüngliche Form zurück. Die Deformation ist somit reversibel. Elastisches Verhalten ist lediglich von der Höhe der Deformation des Prüfkörpers abhängig. Es kann mittels einer hookeschen Feder der Federkonstante „ $k$ “ modellmäßig veranschaulicht werden und repräsentiert das Festkörperverhalten des Polymers.
- **Viskos:** Wenn der Werkstoff auch nach der Entlastung in seiner verzerrten Form persistiert, also die Deformation irreversibel ist, wird von viskosem oder plastischem Materialverhalten gesprochen. Viskoses Materialverhalten ist jedoch geschwindigkeitsabhängig. Es wird in der Regel als Dämpfer mit einer Dämpferkonstanten „ $\eta$ “ veranschaulicht und steht für das fluidische Verhalten des Polymers.
- **Viskoelastisch:** Treten beide oben beschriebenen Effekte im Werkstoff gleichzeitig auf, so wird von viskoelastischem Materialverhalten gesprochen. In diesem Fall überlagern sich die Effekte der Feder und des Dämpfers. Unter Umständen ist es nötig, das komplexe Werkstoffverhalten von Polymerschäumen mit mehreren Feder- und Dämpferelementen zu beschreiben.

### 2.2.2 Grundelemente zur Modellierung der Viskoelastizität

Wie bereits erwähnt, verhalten sich polymere Werkstoffe zum einen wie Festkörper (ideale Federn) und zum anderen wie Fluide (ideale Dämpfer). Durch das Zusammenspiel aus

Feder- und Dämpferelementen kann das komplexe Materialverhalten von kompakten Thermoplasten bereits gut beschrieben werden, so dass eine Modellierung des mechanischen Verhaltens bei langsamer und schwingender Belastung möglich wird [32].

Das Fundament für diese Modellbildung wurde bereits im 19. Jahrhundert von Ludwig Boltzmann gelegt. Nach dem Superpositionsprinzip nach Boltzmann kann das Materialverhalten eines Werkstoffes aus der Überlagerung von beliebigen Anregungsfunktionen (z. B. Feder- und Dämpferelementen) angenähert werden [33]. Dabei gilt, dass das rein elastische Werkstoffverhalten mittels einer hookeschen Feder modelliert werden kann. Die verformungsabhängige Reaktionskraft einer Feder wird direkt über die Federsteifigkeit verknüpft. Die hookesche Feder ist als lineare Feder zu verstehen, folglich ist die Federsteifigkeit  $k$  ein linearer Proportionalfaktor. Die Kraftantwort  $F(x)$  einer hookeschen Feder, welche um den Betrag  $x$  deformiert wurde, kann mittels Gleichung (1) bestimmt werden:

$$F(x) = k * x \quad (1)$$

Ferner ist rein viskoses Werkstoffverhalten mittels eines Dämpfers mit einer Dämpferkonstanten  $\eta$  modellierbar. Im Unterschied zur hookeschen Feder ist die Kraftantwort  $D$  von der Belastungsgeschwindigkeit (1. Ableitung der Verformung nach der Zeit) proportional abhängig. Somit lässt sich die Kraftgröße eines Dämpfers mittels Gleichung (2) direkt bestimmen:

$$D(\dot{x}) = \eta * \dot{x} \quad (2)$$

Werden nun Kraftantwortfunktionen der Feder und des Dämpfers addiert, wird bereits ein erster Baustein zur Beschreibung des linear viskoelastischen Werkstoffverhaltens berechenbar. Dieses einfache Modell der Überlagerung eines Feder- und eines Dämpferelementes wurde bereits von Meyer 1874 postuliert. Bildlich entspricht dies der Parallelschaltung der Elemente Feder und Dämpfer. Es ist auch unter dem Namen Voigt- oder Kelvin-Voigt-Modell bekannt, da Voigt diesen Zusammenhang 1892 wieder aufgriff [32]. Gleichung (3) verdeutlicht das grundsätzliche Zusammenspiel aus Feder- und Dämpferkraft in generalisierter Form weiter:

$$F(x, \dot{x}) = k * x + \eta * \dot{x} \quad (3)$$

Gleichung (3) ist als Differentialgleichung aufzufassen. Nach der in [32] gezeigten Umformung kann schließlich die zeitabhängige Deformation (Retardation = Kriechen) eines solchen Kelvin-Voigt-Systems auf einen konstanten Kraftsprung zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t$  durch Gleichung (4) berechnet werden:

$$x(t) = F_0 * \frac{1}{k} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{\tau_V}} \right] \quad (4)$$

Dabei entspricht  $F_0$  der Höhe des Kraftsprungs zum Zeitpunkt  $t = 0$ ,  $k$  der Federkonstanten und  $\tau_V = \frac{\eta}{k}$  der Zeitkonstanten des Systems. Das Besondere bei diesem Element ist, dass die auf den Kraftsprung folgende Deformation nach Ablauf einer gewissen Zeitspanne einen endlichen Betrag annimmt. Gleichung (5) zeigt, dass die Deformation eines Kelvin-Voigt-Elementes auf einen Kraftsprung der Höhe  $F_0$  bei  $t \rightarrow \infty$  den Betrag von:

$$x_{t \rightarrow \infty} = F_0 * \frac{1}{k} \quad (5)$$

einnimmt. Die Parallelschaltung von Feder und Dämpfer hat somit zur Folge, dass sich durch den Dämpfer zwar eine Verzögerung im Ablauf der Verformung ergibt, sich aber die absolute Deformation nach Ablauf des Vorgangs nicht verändert, da diese lediglich von der Kraft zum Zeitpunkt  $t = \infty$  und der Federkonstante abhängt. Die Zeit, die das Modell zum Herstellen eines Gleichgewichtszustandes benötigt, kann mit Hilfe der für das Modell spezifischen Zeitkonstante  $\tau_V = \frac{\eta}{k}$  berechnet werden. Nach Ablauf einer Zeit, die dem fünffachen der Zeitkonstante entspricht, ist der Einfluss des Dämpfers (= e-Funktion in Gleichung (4)) auf unter 0,7 % abgefallen. Somit ist das Modell aus ingenieurmäßiger Sicht als hinreichend stabil einzustufen.

Eine weitere Kombination aus Feder und Dämpfer ist denkbar, wenn diese in Reihe geschaltet werden. Aus Beobachtungen an Gasen heraus hat Maxwell 1876 ein solches

Modell präsentiert, um viskoelastisches Verhalten fluider Werkstoffe zu beschreiben. Schließlich ist nach [25] und [32] die zeitabhängige Kraftantwort  $F(t)$  (Relaxation) eines solchen Maxwell-Systems mit der Federsteifigkeit  $k$  auf einen Dehnungssprung der Höhe  $\varepsilon_0$  durch Gleichung (6) berechenbar:

$$F(t) = k * \varepsilon_0 * e^{-t/\tau_M} \quad (6)$$

Das grundlegende Konzept eines Maxwell-Modells ist, das zeitabhängige Kraftantwortverhalten eines Werkstoffes auf eine konstante Deformation zu beschreiben. Ein Festkörper, welcher nur aus einer Feder bestünde, zeigte keine Zeitabhängigkeit. Bei dem Maxwell-Modell jedoch ist der in Reihe zur Feder geschaltete Dämpfer für die permanente Reduktion der Reaktionskraft verantwortlich, was auch Relaxation genannt wird. Im Unterschied zum Voigt-Modell kann ein reines Maxwell-Modell so weit relaxieren, dass die resultierende Kraft bis auf 0 absinkt. Aus ingenieurmäßiger Sicht geschieht dies wiederum nach Ablauf einer Zeit, die etwa dem fünffachen der dem Maxwell-Modell zugehörigen Zeitkonstante von  $\tau_M = \frac{\eta}{k}$  entspricht.

Neben den Maxwell- und Voigt-Elementen, die viskoelastisches Materialverhalten adäquat zu beschreiben versuchen, gibt es noch weitere Grundelemente, um z. B. Reibung zu modellieren (Prandtl, Wien-Körper, u. a.). Diese sollen an dieser Stelle nur kurz genannt werden. Ausführlich werden diese z. B. in [34] behandelt.

### 2.2.3 Modellierung der allgemeinen Viskoelastizität

Das Superpositionsgesetz von Boltzmann kann angesetzt werden, um Kelvin-Voigt- und Maxwell-Modelle geschickt derart zu kombinieren, dass sich daraus das viskoelastische Werkstoffverhalten von Polymeren adäquat beschreiben lässt.

Nach Tschögel [32] und in Anlehnung an Findley et al. [25] eignen sich beispielsweise generalisierte Maxwell-Modelle mit  $n$  Elementen zur Beschreibung des Relaxationsverhaltens von Werkstoffen bei dehnungskontrollierter Anregung. Weiterhin ist es nach Tschögel möglich, das Kriechverhalten viskoelastischer Werkstoffe mittels generalisierter Voigt-Mo-

delle zu modellieren. Hierzu werden bis zu  $n$  Elemente desselben Typs addiert. Das zeitabhängige Deformationsverhalten eines Partikelschaums in Folge eines Kraftsprunges kann mittels eines generalisierten Voigt-Modells nach Gleichung (7) modelliert werden:

$$x(t) = F_0 * \left( \frac{1}{k_0} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right] \right) \quad (7)$$

Der Summenterm beschreibt die Superposition einzelner Kelvin-Voigt-Elemente mit jeweils einem Feder-Element (Steifigkeit  $k_i$ ) und einem Dämpfungselement (Dämpfung  $\eta_i$ ). Durch Variation der Anzahl an Feder-Dämpfer-Elementen kann die Genauigkeit der Modellvorhersage gesteigert werden, bis der gemessene Verlauf nahezu exakt nachgebildet wird. Die Parameter werden mittels Fitfunktion unter Zuhilfenahme einer Regressionssoftware ermittelt.

In Arbeiten von Thielen et al. [35] wird dieses Prinzip bereits erfolgreich auf biologische Materialien übertragen und angewendet. Das mechanische Verhalten einer zellulären Struktur (Pomelo-Frucht) im quasi-statischen Laststeigerungsversuch kann adäquat beschrieben werden, wenn insgesamt drei Elemente kombiniert werden.

#### 2.2.4 Schwingendes viskoelastisches Werkstoffverhalten

Die im vorherigen Abschnitt erörterten Maxwell- und Kelvin-Voigt-Modelle zur Beschreibung des viskoelastischen Werkstoffverhaltens unter quasi-statischen Bedingungen können nach [32] auch bei der sinusförmigen Deformation von Materialien Anwendung finden. Da für die phänomenologische Beschreibung der mittleren Dehnung der Partikelschäume in der dynamischen Ermüdung im weiteren Verlauf ein Kelvin-Voigt-Modell angestrebt wird, konzentrieren sich die folgenden Ausführungen auf dieses. In [32] kann diese Rechnung jedoch auch für Maxwell-Modelle nachgelesen werden.

Zunächst soll der Kraftsprung durch eine harmonische, oszillierende Anregung ersetzt werden. Hierzu wird die Amplitude  $\sigma_0$  eingeführt, die das Minimum und das Maximum der Spannung im zeitlichen Verlauf angibt. Aus der Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi f$  ergibt sich die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde  $f$  [Hz] bzw. die Periodendauer  $T = 1/f$  [s].



$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (8)$$

Die Dehnungs-Antwortfunktion eines einzelnen Kelvin-Voigt-Elementes beträgt nach [32]:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0(\omega) * \sin[\omega t + \phi(\omega)] \quad (9)$$

Die Antwortfunktion ist bei kleinsten Belastungsamplituden also eine harmonische Schwingung gleicher Frequenz, jedoch um einen frequenzabhängigen Faktor  $\varepsilon_0(\omega)$  verzerrt und um einen ebenfalls frequenzabhängigen Phasenwinkel  $\phi(\omega)$  verzögert. Wird ein Polymer über die sogenannte nichtlineare Grenze hinaus belastet, so kann die Signalantwort einer rein sinusförmigen Erregung aus der Grundschiwingung und zusätzlichen, ganzzahligen Vielfachen der Grundschiwingung (Oberwellen) dargestellt werden [36].

Aus den theoretischen Überlegungen lassen sich noch offene Arbeitshypothesen ableiten, die im folgenden Verlauf erörtert werden sollen:

- Einzelne Kenngrößen des viskoelastischen Deformationsverhaltens von Partikelschäumen können adäquat durch Kombination aus Feder- und Dämpfer-Elementen phänomenologisch beschrieben werden.
- Die spezifischen Koeffizienten der Feder-Dämpfer-Elemente lassen sich als Funktion der Mittelspannung und der Spannungsamplitude beschreiben, so dass eine Vorhersage des mechanischen Verhaltens von Partikelschäumen bei nahezu beliebigen Lastniveaus möglich wird.

Die Identifizierung der Feder-Dämpfer-Elemente ist mit besonderem zeitlichem Aufwand verbunden. Gerade die Elemente mit einer hohen Zeitkonstante lassen sich erst nach Ablauf einer Prüfzeit, die wenigstens dem Doppelten der Zeitkonstante entspricht, bestimmen. Da es in der Literatur noch keine Anhaltspunkte zu diesen Zeitkonstanten gibt, ist eine möglichst lange Prüfdauer unter konstanten Versuchsbedingungen vorzusehen.

Die Erfassung der Kenngrößen zur phänomenologischen Beschreibung des nichtlinearen viskoelastischen Werkstoffverhaltens erfolgt mittels einer für Hysteresismessungen instrumentierten servo-hydraulischen Prüfmaschine, die nach dem Mittenkurvenverfahren nach Lazan u. a. arbeitet. Die Arbeitsweise wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

### 2.3 Hysteresismessungen

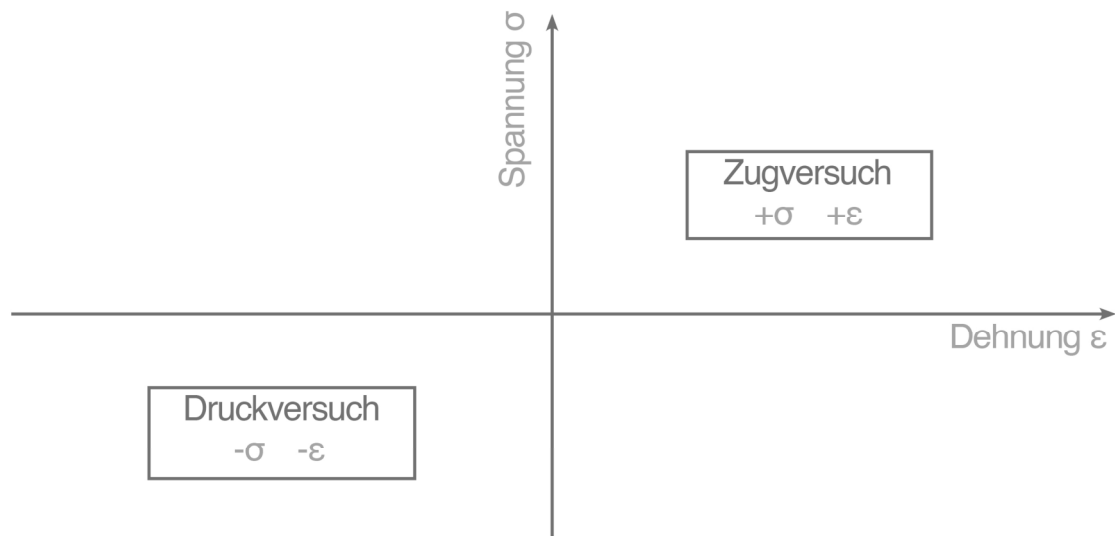
In der nichtlinearen Prüfung von kompakten Polymeren hat sich die Auswertung der Mittenkurve nach der von Lazan beschriebenen Methode etabliert [34]. Zahlreiche Publikationen profitieren von der Möglichkeit, zyklische Deformationsversuche auch im nichtlinearen Bereich durchzuführen und gleichzeitig eine visuelle Repräsentation der Messdaten zur Verfügung zu haben (z. B. [37, 38]).

Die Auswertung der Messsignale erfolgt bei Lazan mittels der aus den Messungen gewonnenen Hysteresisschleifen. Pro Schwingenspiel werden dabei die transienten Größen Kraft und Verformung nicht nach der Zeit, sondern gegeneinander aufgetragen. Durch die Digitalisierung und Visualisierung der Messsignale bereits bei laufender Messung kann eine detailliertere Bewertung von schwingenden Vorgängen in Echtzeit vorgenommen werden. Die Echtzeitvisualisierung der Hysteresisschleifen hilft auftretende Fehler im Versuchsablauf direkt im Versuchsdiagramm zu erkennen.

In den Ingenieurwissenschaften haben sich zudem gewisse Notationen etabliert. Beispielsweise werden Probendeformationen unter Zug mit positivem Vorzeichen im Spannungs-Dehnungs-Diagramm aufgetragen. Druckdeformationen hingegen werden als negative Werte eingetragen.

Ein Kraft-Weg-Diagramm (oder Spannungs-Dehnungs-Diagramm) kann also in vier Sektoren eingeteilt werden (sh. Abbildung 15). Sind sowohl Deformation als auch Kraft positiv, so sind Werte aus Zugversuchen ermittelt worden, welche im 1. Sektor eingetragen werden. Spannung und Dehnung sind nur in Druckversuchen negativ. Somit sind diese Werte im 3. Sektor zu finden.

Vorteil des Verfahrens ist, dass komplexe Signalverläufe bereits während der Prüfung graphisch präsentiert werden können. Selbst für einen ungeübten Beobachter wird es somit möglich, Veränderungen im Probanden an der Formänderung der Hysteresisschleifen frühzeitig zu bemerken.



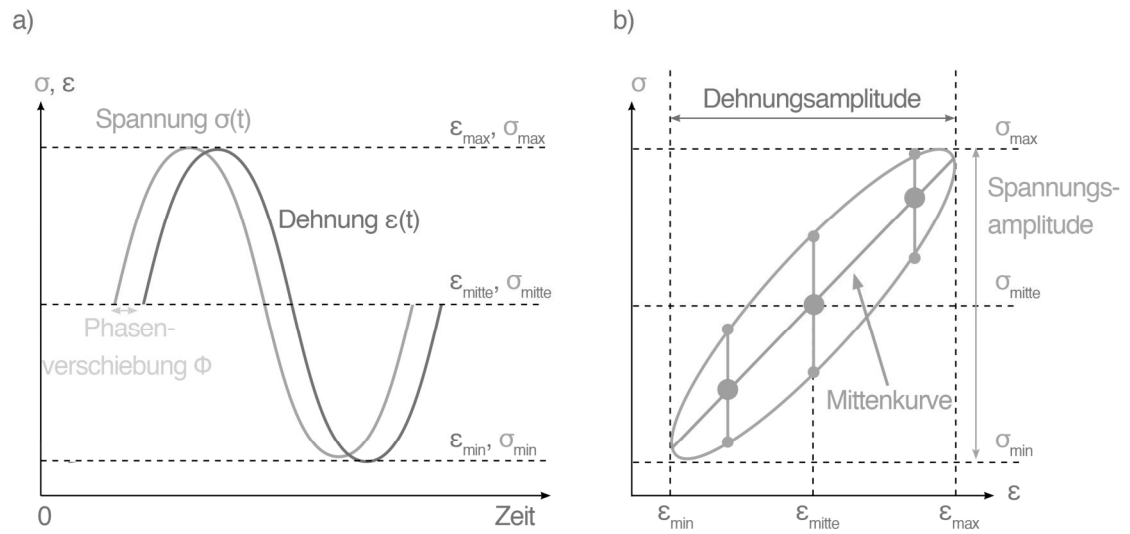
**Abbildung 15** Grafische Unterscheidung zwischen Zug- und Druckversuch.

Zur Konstruktion der Hysteresisschleifen nach Lazan [34] wird für je ein Schwingenspiel, bestehend aus Be- und Entlastung, das Signal „Weg“ als Referenz für die Abszisse und das Signal „Kraft“ als abhängige Ordinate verwendet. Aus dieser lassen sich nun Kennwerte ableiten, die im Weiteren erörtert werden:

- **Mittenkurve:** Aus der Hysteresisschleife kann die Mittenkurve direkt abgeleitet werden. Die Mittenkurve stellt das arithmetische Mittel aus zwei Kraftwerten dar, die an derselben Wegposition gemessen werden. Dies ist in Abbildung 16 durch die hellblaue Kurve schematisch für eine unter Zug ermittelte Hysteresisschleife dargestellt. Im linearen Fall bildet die Mittenkurve eine Gerade und teilt die Hysteresisschleife symmetrisch. Erst im nichtlinearen Fall, wenn das Materialverhalten z. B. eine Dehnverfestigung aufweist, bildet die Mittenkurve auch keine Gerade mehr.
- **Dynamischer Modul:** Die (mittlere) Steifigkeit eines Materials, vergleichbar mit der Federkraft einer Feder, lässt sich aus der Sekante durch die beiden Umkehrpunkte der Hysteresisschleife bilden. Im linearen Fall fällt dieser Wert mit der Mittenkurve zusammen. Im nichtlinearen Fall bildet der dynamische Modul eine Approximation der Materialsteifigkeit.

- **Speicherarbeit:** Das schwingende System überschreitet innerhalb eines Schwingungszyklus einen Punkt, an dem die Kraft sich maximiert. An diesem Punkt besitzt das System die höchste potentielle Energie. Dieser Punkt kann mit einem maximal gespannten Gummiband verglichen werden. Die Speicherarbeit ist nach Lazan ein Maß für die in das Material eingebrachte Energie, die benötigt wird, um diesen Deformationszustand zu erreichen. Bei der Entlastung kann nun ein Teil dieser Arbeit wieder in mechanische Energie gewandelt werden.
- **Verlustrarbeit:** Durch viskose Effekte, innerhalb der Probe ausgelöst durch z. B. Reibung der Polymerketten, wird nicht die Menge an Energie freigesetzt, die maximal zur Deformation eingebracht wurde (sh. Speicherarbeit). Der Energieaustrag ist geringer. Verlustrarbeit ist das Maß an Energie, das nötig ist, um das System im Zustand der Schwingung mit definierten Randbedingungen zu halten. Symbolisiert wird die Verlustrarbeit direkt durch die einhüllende Fläche der Hysteresekurve. Je größer diese Fläche ist, desto höher ist auch die Verlustrarbeit.
- **Dämpfung:** Es handelt sich dabei um ein Verhältnismaß aus Verlustrarbeit und Speicherarbeit. Der prozentuale Anteil gibt an, wie hoch der Energiemehraufwand ist, um das System am Schwingen zu halten. Theoretisch liegt die Dämpfung bei rein elastischen Werkstoffen bei 0 % und bei rein viskosen Werkstoffen bei 100 %. Sollte ein Material keinerlei Dämpfung aufweisen, also rein hookesch sein, so wäre die Form der Hysteresisschleife lediglich eine Gerade. Viele polymere Materialien zeigen hingegen eine endliche Dämpfung, so dass die Hysteresekurve selbst immer eine Schleife mit einer gewissen Breite ist (sh. Abbildung 16).

Eine Besonderheit ist hervorzuheben: Die Mittenkurve halbiert im linearen viskoelastischen Bereich die Hysteresisschleife symmetrisch. Zeigt die Probe in Folge der gesteigerten Belastung nichtlineare Effekte, so wird die Hysteresekurve automatisch nicht mehr symmetrisch sein. In der Folge beschreibt die Mittenkurve auch keine Gerade mehr. Somit kann bereits bei laufender Messung eine Materialcharakterisierung erfolgen.



**Abbildung 16** a) Zeitlicher Verlauf der Spannung und Dehnung (schematisch).  
 b) Hysteresiskurve mit Konstruktion der Mittenkurve (schematisch) [34].

### 3 Zielsetzung und Struktur der Arbeit

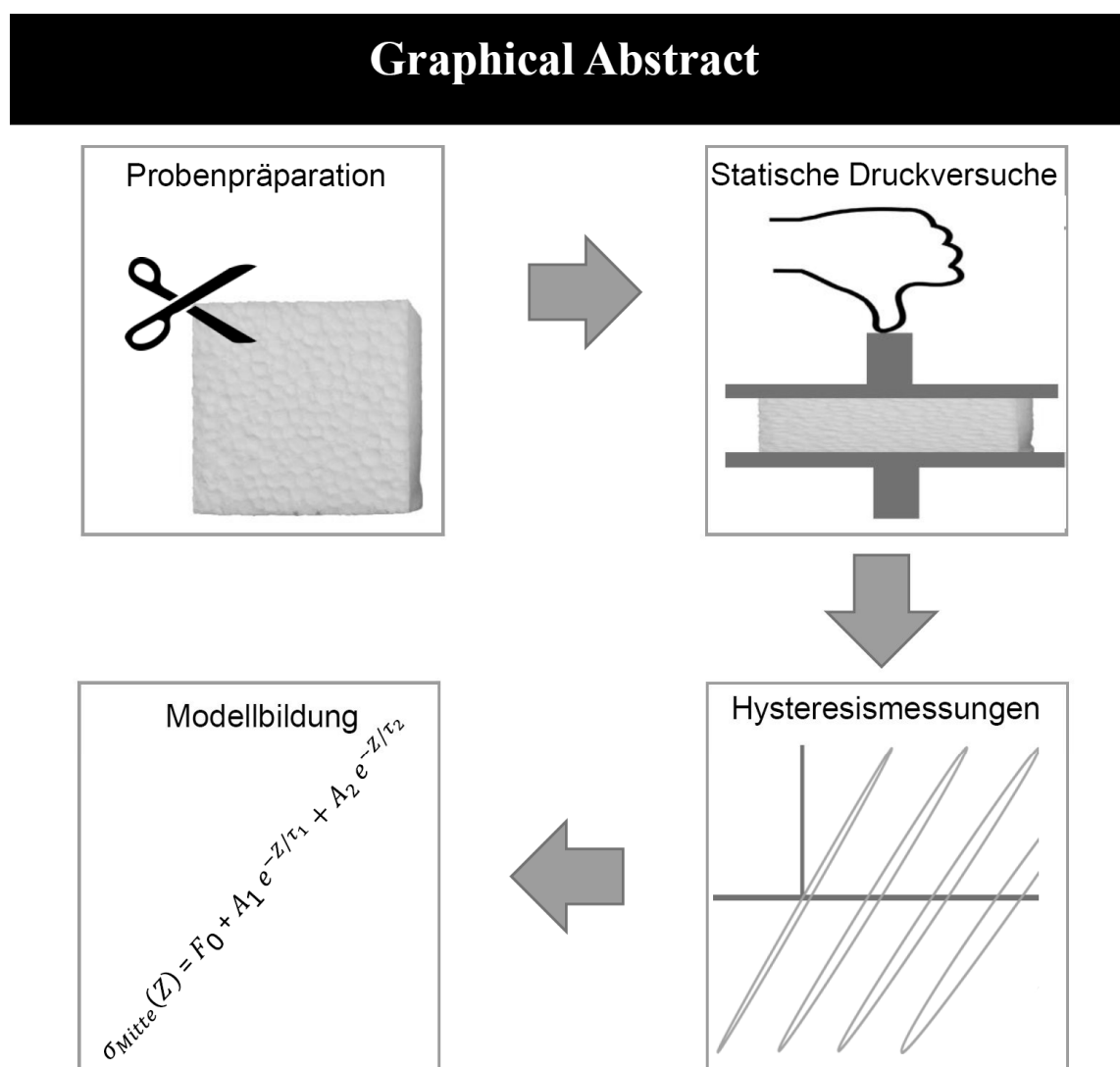
Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, wissenschaftliche Grundlagen für die ingenieurmäßige Auslegung der Lebensdauer schwingend belasteter Formteile aus Partikelschäumen zu schaffen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der experimentellen Bestimmung der mechanischen Druckeigenschaften von zwei grundsätzlich unterschiedlichen Partikelschäumen gleicher Dichte unter Ermüdungsbeanspruchung sowie der Erstellung und Validierung eines Modells zur Vorhersage der mittleren Deformation als Funktion der Druckbelastung. Weiterhin werden die Effekte der Druckbelastung auf die im Partikelschaum wirkenden Vorgänge diskutiert. Hieraus leiten sich folgende Teilziele ab:

- Ziel der Arbeit ist es, ein Verständnis für den Einfluss der Belastungsamplitude und der Mittelspannung auf die mechanischen Eigenschaften von EPS und EPP mit der Dichte von  $30 \text{ kg/m}^3$  zu gewinnen. Insbesondere soll der Übergang vom linearen zum nichtlinearen viskoelastischen Verhalten und somit die Grenze zum sekundären Kriechen identifiziert werden.
- Ein weiteres Ziel dieser Arbeit besteht darin, mittels eines generalisierten Feder-Dämpfer-Modells die Mitteldehnung von EPS und EPP als Funktion der Mittelspannung und der Spannungsamplitude modellmäßig zu beschreiben.
- Durch die Anpassung der Messgrößen an empirische Parameterfunktionen soll das mechanische Verhalten der Partikelschäume in verschiedenen Deformationsbereichen vorhersagbar werden.
- Ziel ist es außerdem, die identifizierten Modellkoeffizienten physikalischen Effekten im Partikelschaum zuzuweisen.

Um diese Ziele zu erreichen, wird folgende Vorgehensweise verfolgt: Die mechanischen Eigenschaften der Partikelschäume werden zunächst in Abschnitt 6.2 mittels quasi-statischer Prüftechnik bestimmt. Anschließend erfolgt in Abschnitt 6.3 die systematische Bestimmung der Ermüdungseigenschaften der Partikelschäume bei einer konstanten Prüffrequenz von

5 Hz als Funktion der Mittelspannung und Spannungsamplitude. Schließlich wird in Abschnitt 6.4 die Mitteldehnung als Funktion der Belastungsgrößen Mittelspannung und Spannungsamplitude modelliert. Zum Schluss wird das Modell erweitert, so dass eine Vorhersage des mechanischen Verhaltens möglich wird.

Die Struktur der Arbeit wird in der folgenden Abbildung 17 als graphischer Abriss schematisch verdeutlicht.



**Abbildung 17** Graphischer Abriss der Arbeit.

## 4 Materialien

Die verwendeten Materialien sind kommerziell erhältliche Halbzeuge. Expandierbares Polystyrol (EPS) ist z. B. im Warenhandel für Modellbauer als Platten- oder Blockware erhältlich. Es wurde eine Dichte von  $30 \pm 3 \text{ kg/m}^3$  verwendet und das Material von einem lokalen Lieferanten in Form von 20 mm dicken Platten bezogen.

Expandiertes Polypropylen (EPP) wurde als vorgeschäumter Partikel angeliefert. Im Formteilautomaten (TVZ 125/85, Teubert Maschinenbau GmbH, Blumberg, Deutschland) wurden die Partikel unter Einwirkung von Hitze zu einem Block verschweißt, aus dem schließlich die Proben präpariert wurden. Die Dichte betrug auch hier  $30 \pm 3 \text{ kg/m}^3$ . Die EPP-Materialien wurden von der Neuen Materialien Bayreuth GmbH zur Verfügung gestellt.

Durch den unterschiedlichen Aufbau der Polymerketten ergeben sich spezifische Eigenschaften, die sich auf die Einsatz- und Verarbeitungstemperatur der Partikelschäume auswirken.

EPS ist ein amorpher Partikelschaum und besteht aus einer einzigen Phase mit einem Glasübergangspunkt von etwa  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Unterhalb dieser sind die Polymerketten in einem energieelastischen (eingefrorenen, glasartigen) Zustand. Die Gebrauchstemperatur liegt bei EPS somit unterhalb von  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

EPP ist ein teilkristalliner Partikelschaum und besteht aus zwei Phasen, einer amorphen und einer kristallinen, welche durch die sterische Ordnung der Molekülketten entstehen. EPP besitzt einen Glasübergangspunkt von etwa  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  und zusätzlich noch einen Kristallisationsbereich ab  $130 \text{ }^\circ\text{C}$ . Wird EPP bei Raumtemperatur eingesetzt, so ist die amorphe Phase des Polymers bereits im entropieelastischen Bereich und die Polymerketten können sich leichter gegeneinander verschieben als es bei EPS der Fall ist.

Zur mechanischen Prüfung haben sich würfelförmige Probekörper etabliert. Die Kantenlänge der Prüfkörper variiert zwischen 12,5 mm und 50 mm, je nach Versuch. Die Proben werden mittels einer Bandsäge auf Maß geschnitten.



## 5 Methoden

### 5.1 Morphologie

Zur Überprüfung der Herstellerangaben hinsichtlich der Dichte und zur Selektion geeigneter Prüfkörper wird die Dichte der Materialien stichprobenartig an fünf Probekörpern je gelieferter Platte ermittelt. Hierzu wird eine nach dem archimedischen Prinzip arbeitende Dichtewaage (AG245, Mettler Toledo, Columbus, Ohio, Vereinigte Staaten) bei Raumtemperatur mit Wasser als Referenzmedium verwendet.

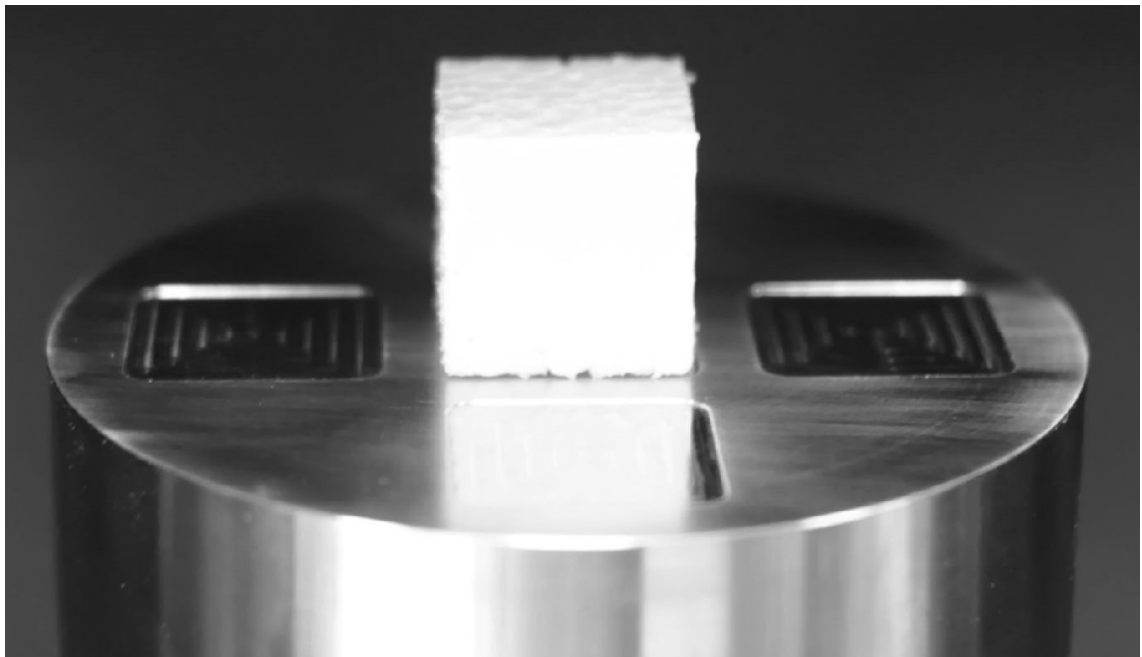
### 5.2 Probenhalter

Die bei der mechanischen Prüfung benötigte Zeit hängt sowohl von der Versuchsdauer als auch von der Anzahl zu prüfender Probekörper ab. Das gleichzeitige Prüfen von mehreren Prüfkörpern hat somit gewisse Vorteile:

- Eine Verringerung der Prüfzeit um die Anzahl der gleichzeitig geprüften Probekörper.
- Alle Probekörper erfahren innerhalb der Messung dieselben Umgebungsbedingungen. So wirken sich Temperaturschwankungen der Umgebung beispielsweise auf alle Proben gleichermaßen aus.
- Veränderungen im Material als Folge einer Konditionierung, z. B. durch Lagerung in Medien (Wasser, Öl, etc.), können mit relativ wenig Aufwand zeitgleich an mehreren Probanden erfolgen.
- Die Verringerung der Prüfzeit hat schließlich auch wirtschaftliche Anreize.

Die für die Druckversuche verwendeten Probenhalter haben die Möglichkeit, bis zu fünf Probekörper gleichzeitig zu prüfen (sh. Abbildung 18). Die noch offene Arbeitshypothese lautet, dass es unter der Voraussetzung der Homogenität des Ausgangsmaterials hinsichtlich seiner Morphologie keinen signifikanten Unterschied gibt, ob ein, zwei oder beispielsweise fünf Probekörper gleichzeitig getestet werden. Die in den Probenhalter gefräste Vertiefung von lediglich 0,1 mm stellt eine physikalische Begrenzung dar und beschränkt die laterale

Bewegung der Probe während der Versuche. Bezogen auf die Probengeometrie von 25 mm Kantenlänge stellt die Vertiefung eine vernachlässigbar kleine und vertretbare Einschränkung dar. Somit ist zu jeder Zeit gewährleistet, dass ein unbeabsichtigtes Herausrutschen der Proben verhindert wird. Außerdem kann so auf den Einsatz von adhäsiven Hilfsmitteln wie Klebeband verzichtet werden, welche einen ausgeprägt negativen Effekt auf die Querkontraktion und somit auch auf das Prüfergebnis hätten.



**Abbildung 18** Probenhalter mit Aufnahmen zur Prüfung von bis zu fünf Proben gleichzeitig.

### 5.3 Quasi-statische Druckeigenschaften

Die mechanischen Druckeigenschaften unter quasi-statischen Versuchsbedingungen werden mit einer universellen Prüfmaschine (Z7050, Zwick//Roell, Ulm, Deutschland) bestimmt. Im Folgenden werden die einzelnen Testmethoden, die bei der quasi-statischen Messung eingesetzt werden, vorgestellt.

#### 5.3.1 Einfluss der Geometrie

Die Norm für Druckversuche an Schäumen sieht vor, dass würfelförmige Proben mit einer Kantenlänge von 50 mm zu verwenden sind, damit ein ausreichend großes Volumen gleich-

zeitig getestet wird. Es gibt jedoch für Partikelschäume Einsatzgebiete, bei denen Bauteildimensionen im Bereich von nur beispielsweise 20 mm liegen. Insbesondere für Strukturbauteile im Automobil ist dieser Bereich von äußerstem Interesse.

Ziel dieser Untersuchung ist es, den Einfluss der Geometrie auf die Ergebnisse der mechanischen Prüfung aufzudecken. Hierzu wird die Kantenlänge der Probekörper von 12,5 mm auf 25 mm und schließlich 50 mm erhöht, so dass eine gesamte Anzahl an Schaumpartikeln von ca. 1.000 über 8.000 zu 64.000 in einem Volumen gleichzeitig getestet wird.

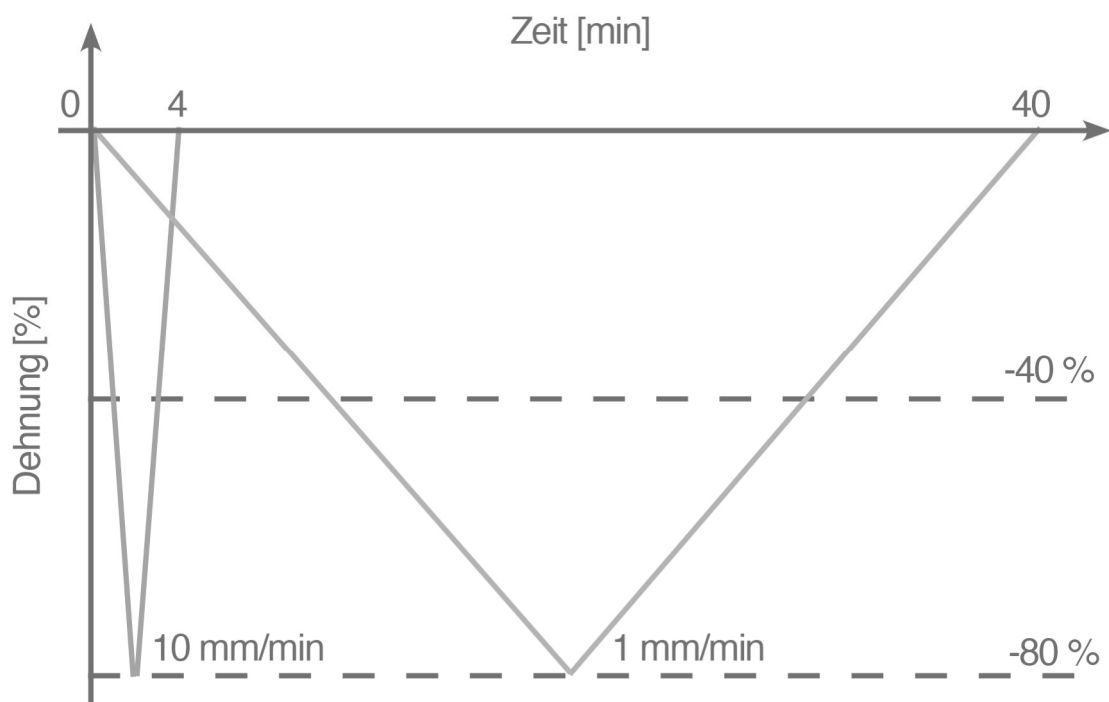
### 5.3.2 Einfluss der Prüfgeschwindigkeit

Das charakteristische Materialverhalten unter einfacher Druckbelastung als Funktion der Prüfgeschwindigkeit und der Deformation zu bestimmen, ist Ziel dieses Abschnittes. Hierzu wird die Geschwindigkeit der Traverse der Universalprüfmaschine systematisch im Bereich von 0,1 mm/min bis 50 mm/min variiert. Die Proben werden dabei bis zu einer Dehnung von 80 % belastet.

### 5.3.3 Druckverformungsrest

Allgemein bekannt ist, dass die mechanischen Eigenschaften der Partikelschäume von der Geschwindigkeit der Belastung abhängen. Bisher fehlt jedoch die Korrelation der Auswirkung der Prüfgeschwindigkeit und der daraus resultierenden zeitlichen Belastung zu der verbleibenden plastischen Deformation. Dies wird an einem Beispiel näher erläutert. Zunächst ist zu bemerken, dass die in Abschnitt 5.3.2 genannte Druckbelastung von 80 % Dehnung, bezogen auf die Ausgangshöhe der Prüfkörper, mittels einer linearen Bewegung der Traverse auf die Probe aufgebracht wird. Die Probe wird schließlich mit derselben Geschwindigkeit entlastet, bis die Traverse ihre Anfangsposition wieder erreicht. Im zeitlichen Durchschnitt lastet auf der Probe somit eine Kompression von 40 %. Durch Variation der Traversengeschwindigkeit im Bereich von 0,1 mm/min bis 50 mm/min erfährt die Probe diese Belastung nun in einem Zeitraum zwischen unter einer Minute und über 500 Minuten. Dies ist exemplarisch für Prüfgeschwindigkeiten von 10 mm/min und 1 mm/min und eine Probenhöhe von 25 mm schematisch in Abbildung 19 dargestellt. Hierdurch stellt sich eine für das Material individuelle plastische Deformation als Funktion der Prüfdauer ein. Dies

soll mittels eines Ansatzes, ähnlich dem des Druckverformungsrestes (DVR), berechnet werden. Das Maß bildet die Rückstellung nach einer definierten Druckverformung relativ zur Probenhöhe ab. Ein DVR von 0 % bedeutet somit eine vollständige Erholung der Probe, und folglich findet keine plastische Deformation statt (ein theoretischer Fall). Ein DVR von 100 % hingegen bedeutet, dass sich die Probe nach der Entlastung nicht mehr zurückbildet.



**Abbildung 19** Prüfdauer als Funktion der Prüfgeschwindigkeit.

### 5.3.4 Mehrfache Druckbelastung

Partikelschäume zeigen ein veränderliches mechanisches Verhalten bei wiederholten Belastungen [29, 30]. Zur weiteren Aufklärung dieses Verhaltens werden quasi-statische Hysteresismessungen durchgeführt. Durch die kontinuierlichen Be- und Entlastungen werden Gewöhnungseffekte schnell sichtbar. Ziel ist die Ermittlung der Veränderung mechanischer Kenngrößen bei langsamen Deformationen und wenigen Schwingspielen. Der Prüfablauf ist in Tabelle 1 verdeutlicht.

**Tabelle 1** Prüfmuster zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften als Funktion der quasi-statischen Lastzyklen.

<b>Prüfgeschwindigkeit (Traverse)</b>	10 mm/min
<b>Belastungshöhe</b>	50 % Deformation (bezogen auf Ausgangshöhe)
<b>Entlastungshöhe</b>	0 % Deformation (bezogen auf Ausgangshöhe)
<b>Anzahl der Zyklen</b>	10

#### 5.3.4.1 Auswertung der quasi-statischen Hysteresismessungen

Zur Auswertung der Prüfdateien aus den quasi-statischen Hysteresismessungen wird eine Software für Datenauswertung (Matlab 2015R1, MathWorks, Natick, USA) verwendet. Die hierzu neu entwickelte Routine basiert auf den mathematischen Grundlagen von Lazan [34]. Vorteil ist, dass das Programm zur Datenmanipulation unabhängig von der Prüfsoftware läuft. Außerdem ist die Datenmanipulation in dieser Software als Stapelverarbeitung möglich, sodass mehrere Messungen in einem Vorgang ausgewertet werden können.

Der Abdruck der Arbeitsweise des Programms ist in Kapitel 10 Anhang A: Auswerteroutine in Matlab (S. 122) aufgeführt. Die grundsätzliche Vorgehensweise ist mittels Integralbildung zwischen den einzelnen Messpunkten realisiert. Die so gebildete Fläche unter und zwischen der einhüllenden Hysteresisschleife kann somit erstmals auch im quasi-statischen Fall systematisch ausgewertet werden. Die Routine gibt nach der Auswertung der Speicherarbeit, Verlustarbeit und der Dämpfung auch noch die Energieabsorptionseffizienz und die einzelnen Hysteresekurven getrennt aus. Die neuen Auswertungsmöglichkeiten erweitern das Spektrum der quasi-statischen Prüfung der Partikelschäume.

### 5.4 Dynamische Hysteresismessungen

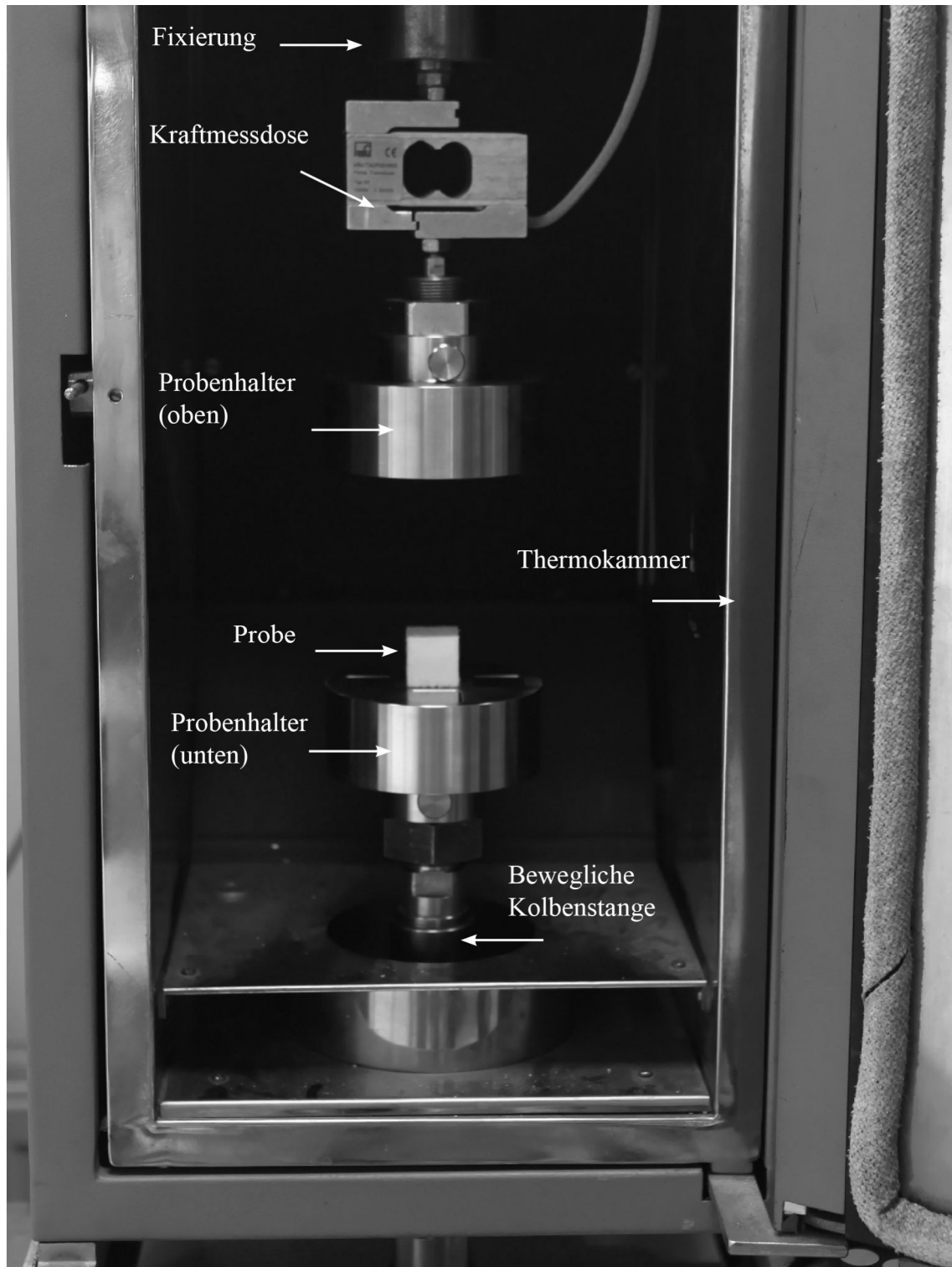
Zur Ermüdungsprüfung von EPS30 und EPP30 wird eine servo-hydraulische Prüfmaschine (PSA 010, Schenck/Instron, Darmstadt, Deutschland) verwendet. Der hydraulisch betätigte Kolben weist einen maximalen Hub von 100 mm und eine Kraftwirkung von 8 kN statisch und 10 kN dynamisch auf und bietet auch für anspruchsvolle Regelvorgänge ausreichend Leistungsreserven.

Der Versuchsaufbau wird in Abbildung 20 dargestellt. Auf dem beweglichen Kolben (unten) befindet sich der Probenhalter samt Probe. Zur Überwachung der Probenkerntemperatur ist die Probe mit einem äußerst dünnen Thermosensor (Typ K) ausgestattet, welcher mittels Analog-Digital-Konverter (Almemo 2309-8, Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen, Deutschland) mit dem Mess-PC (Windows PC) verbunden ist und Temperaturveränderungen von 0,5 °C aufzeichnet. Der obere Probenhalter ist an einer 200 N Kraftmessdose (Typ S2, HBM, Darmstadt, Deutschland) fest mit der Traverse verbunden. Die Räumlichkeiten werden nach DIN EN ISO 291 [39] stets auf Normklima 23/50 (23 °C, 50 % relative Luftfeuchte) temperiert. Zusätzlich wird der Versuch innerhalb einer Thermokammer durchgeführt. Hierdurch wird gewährleistet, dass sich kurzfristige Temperaturschwankungen nicht direkt auf die Probe niederschlagen. Die Thermokammer wird nicht aktiv beheizt oder gekühlt.

Die Ermüdungsprüfung wird stets in Kraftregelung durchgeführt. Hierbei werden dem PID-Regler (Typ 8400, Instron, Darmstadt, Deutschland) zwei Kraftniveaus vorgegeben, die innerhalb einer vorgegebenen Zeit sinusförmig angesteuert werden. Die Wahl der Prüffrequenz erfolgt stets so, dass eine Temperaturerhöhung im Kern der Probe von mehr als 5 °C nicht überschritten wird.

Die Kalibrierung der Kraftmessdose erfolgt mit einem externen Kraftaufnehmer (HBM Scout) und einer weiteren Kalibriermessdose in Reihe. Da die Kraftmessdose einen relativ hohen Nennmessweg bei Nennkraft aufweist, muss dieser bei der Ermüdungsprüfung berücksichtigt werden. Hierfür wurde die spezifische Kraft-Weg-Kennlinie der Kraftmessdose an einer universellen Prüfmaschine im Vorfeld aufgenommen.

Die so bestimmte apparente Steifigkeit wurde in der Prüfsoftware berücksichtigt. Somit kann die Maschinensteifigkeit entsprechend korrigiert werden und die Prüfmaschine liefert bei der Prüfung korrekte Weg-Messwerte über den gesamten Kraftbereich der Kraftmessdose. Außerdem können so die Linearität und die einwandfreie Funktion der Kraftmessdose dokumentiert werden.

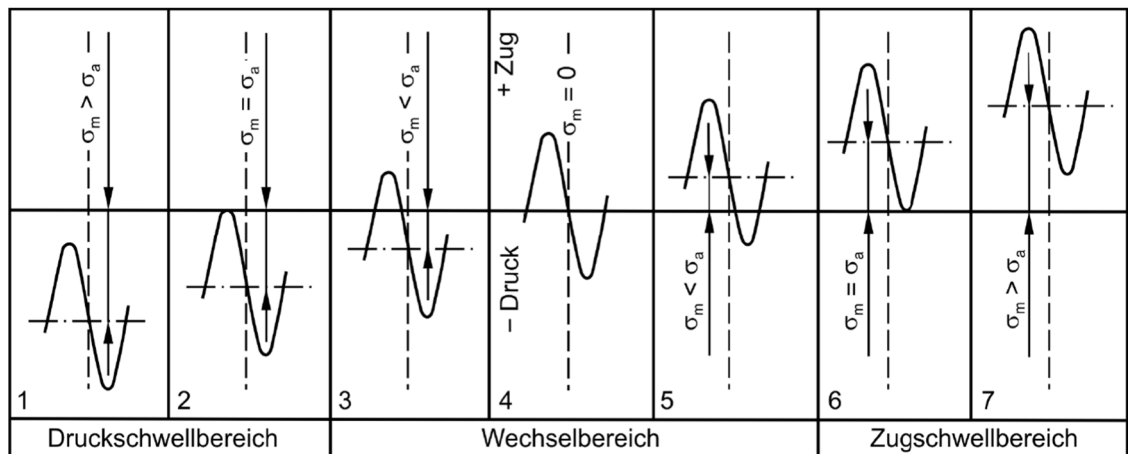


**Abbildung 20** Prüfaufbau zur Ermittlung der Ermüdungseigenschaften der Partikelschäume.

### 5.4.1 Dynamische Ermüdung bei festem R-Verhältnis

Bei der Ermüdungsprüfung ist sowohl die Amplitude als auch das zeitliche Mittel der Belastung als Einflussfaktor zu benennen. Daraus ergibt sich eine obere und eine untere Last, zwischen welchen die Probe während einer Periode belastet wird. Das R-Verhältnis kann aus dem Quotienten des unteren und des oberen Lastniveaus gebildet werden. Abbildung 21 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Mittelspannung und Spannungsamplitude für die unterschiedlichen Belastungsbereiche Zug-, Druck- und Wechselbereich schematisch nach [40]. In der vorliegenden Arbeit wird grundsätzlich im Bereich 1 geprüft. Die dynamischen Druckversuche werden bei unterschiedlichen Mittelspannungen und Spannungsamplituden durchgeführt, so dass sich für jeden Versuch eigenständige R-Verhältnisse einstellen.

Zusätzlich wird für EPS30 und EPP30 bei der jeweils kritischen Spannung das dynamische Kriechen bei einem R-Verhältnis von 0,1 bestimmt. Die Belastungsgröße entspricht dabei dem 10-fachen der Entlastungsgröße. Dieser Wert hat sich in der Prüfung von (metallischen) Werkstoffen etabliert und dient als praxisnaher Lastfall.



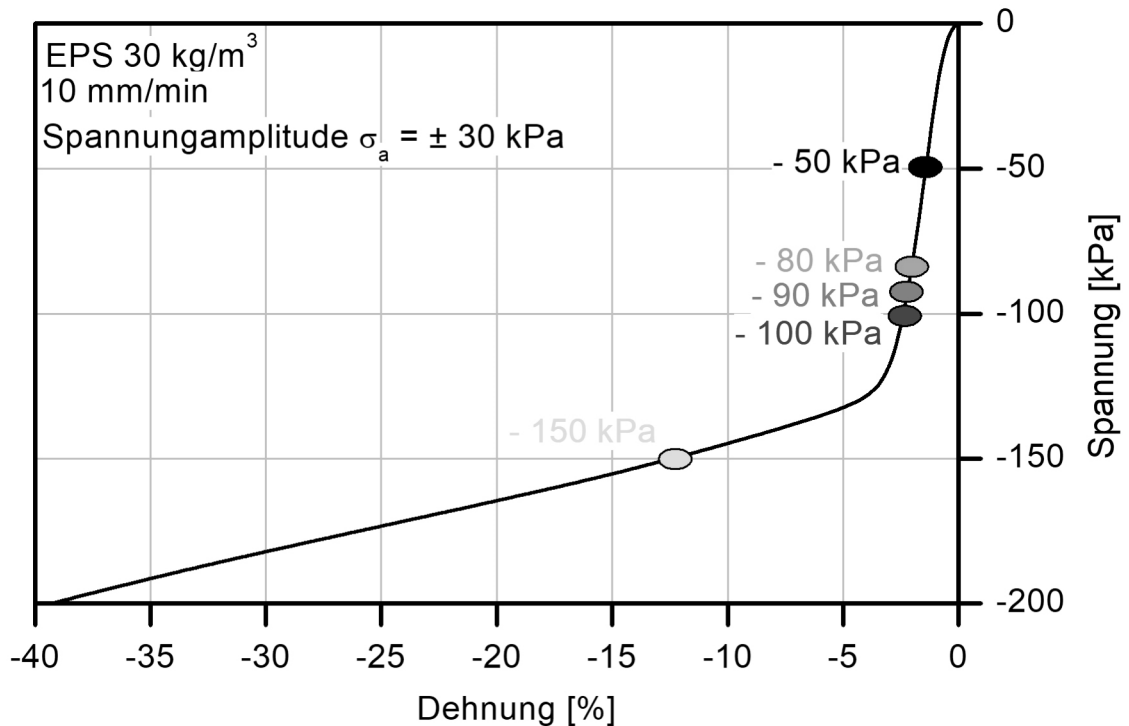
**Abbildung 21** Lastbereiche der Ermüdungsprüfung [40].

### 5.4.2 Mitteldehnung von EPS30 als Funktion der Mittelspannung

Gezielt den Einfluss der Mittelspannung auf das dynamische Kriechen von EPS30 (= Mitteldehnung) aufzudecken, ist Ziel dieses Abschnitts. Hierzu werden Proben aus EPS30 mit einer konstanten Frequenz von 5 Hz, einer konstanten Spannungsamplitude von  $\pm 30$  kPa und variabler Mittelspannung getestet. Die Lastniveaus sind bewusst so gewählt, dass der



linear-elastische Bereich bis zum Übergang zum Plateaubereich abgedeckt wird. Die mithilfe der quasi-statischen Versuche bestimmte kritische Spannung  $\sigma_c = -150 \text{ kPa}$  (vgl. Abschnitt 6.3.1) dient als Grundlage zur Berechnung der geplanten Mittelspannungen.



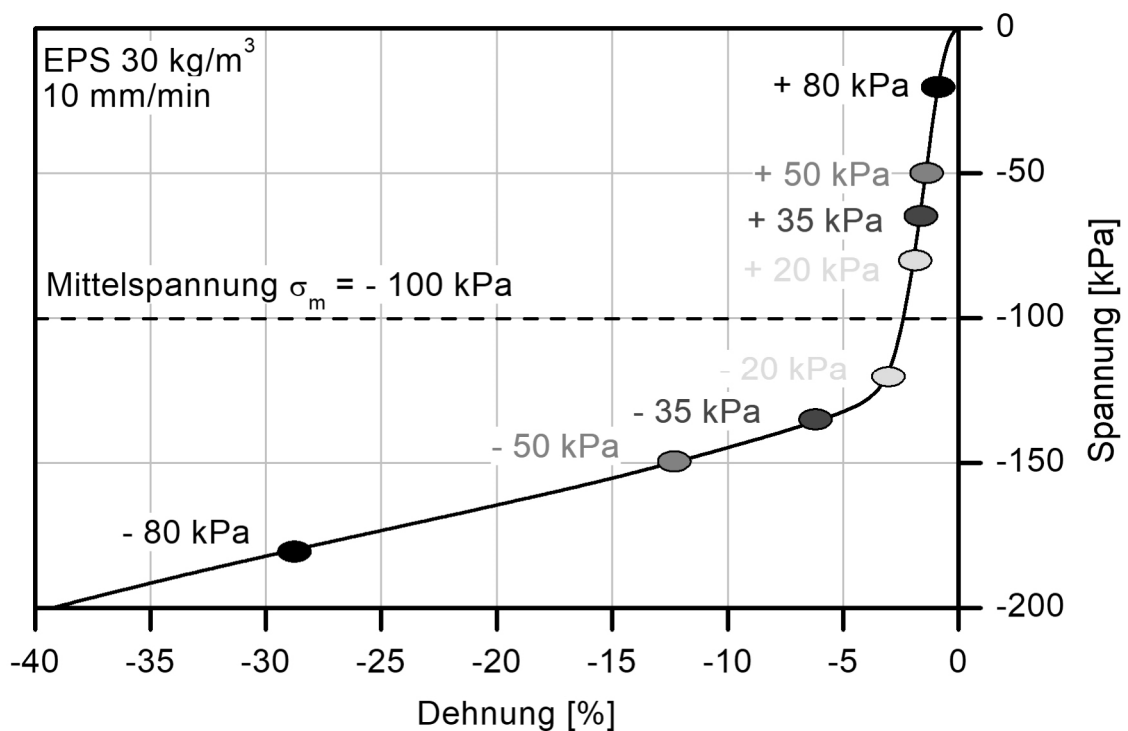
**Abbildung 22** Gewählte Mittelspannungen für die Ermüdungsprüfung EPS.

Die Mittelspannung bei - 50 kPa (33 %  $\sigma_c$ , schwarz) repräsentiert den linear-elastischen Bereich. Bei einer Mittelspannung von - 100 kPa (66 %  $\sigma_c$ , blau) ist bereits der Übergang zum Plateau abgedeckt. Die Mittelspannung von - 150 kPa (100 %  $\sigma_c$ , grün) prüft im Plateaubereich. Ein weiteres Ziel dieser Versuche ist die Bestimmung der Grenze, ab der sich der dynamische Kriechmodus ändert. Bisher ist hierzu noch nichts aus der Literatur bekannt. Daher sind noch zwei weitere Lastniveaus bei - 90 kPa (rot) und - 80 kPa (orange) als Mittelspannung vorgesehen, um diese Grenze möglichst präzise zu bestimmen. Abbildung 22 zeigt die geplanten Mittelspannungen im quasi-statischen Spannungs-Dehnungs-Profil von EPS30.

### 5.4.3 Mitteldehnung von EPS30 als Funktion der Spannungsamplitude

Der Einfluss der Spannungsamplitude auf die Mitteldehnung von EPS30 soll in diesem Abschnitt untersucht werden. Hierzu wird im Unterschied zum vorherigen Abschnitt die Mittelspannung bei - 100 kPa (66 %  $\sigma_c$ ) konstant gehalten. Die Mittelspannung ist deshalb so hoch gewählt, damit eine Prüfung mit kleinen und großen Spannungsamplituden bis  $\pm 80$  kPa gewährleistet wird.

Abbildung 23 zeigt die für diese dynamischen Ermüdungsversuche korrespondierenden Belastungspunkte im quasi-statischen Spannungs-Dehnungs-Diagramm von EPS30. Der Prüfkolben fährt diese, den paarweise farbig markierten Spannungsniveaus entsprechend, innerhalb eines Schwingungsspiels sinusförmig an.

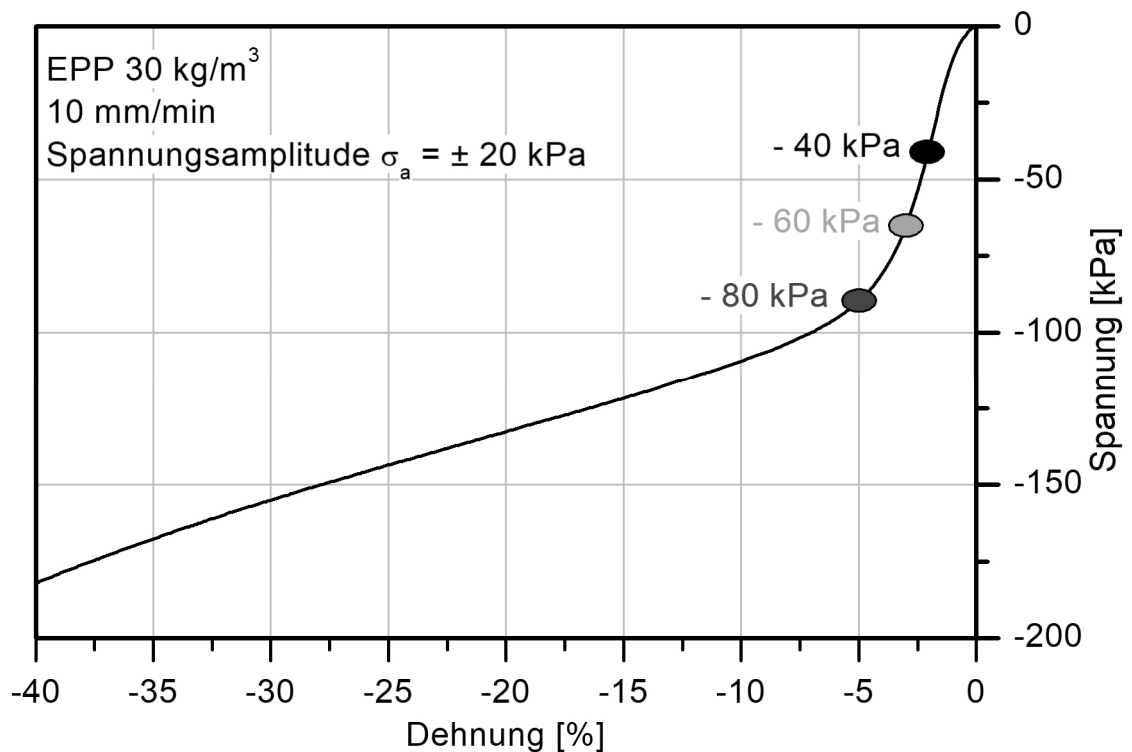


**Abbildung 23** Gewählte Spannungsamplituden für die Ermüdungsprüfung von EPS.

### 5.4.4 Mitteldehnung von EPP30 als Funktion der Mittelspannung

Analog zum EPS30 wird auch für das EPP30 der Einfluss der Mittelspannung auf die Mitteldehnung untersucht. Hierzu wird ebenfalls eine mithilfe der quasi-statischen Versuche für EPP30 bestimmte kritische Spannung  $\sigma_c$  als Richtgröße (sh. Abschnitt 6.3.1) verwendet.

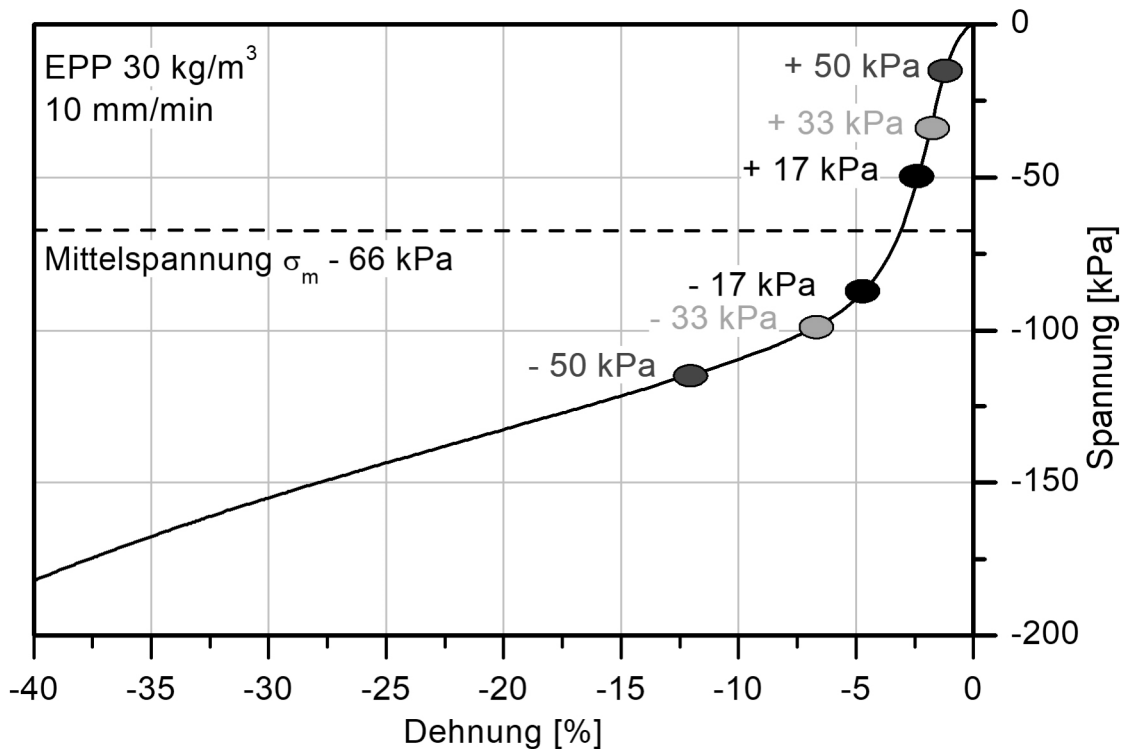
Die Mittelspannungen werden auf 40 %, 60 % und 80 % von  $\sigma_c$  gesetzt. Die Spannungsamplitude wird ebenfalls dem geltenden Spannungsverhältnis entsprechend auf  $\pm 20$  kPa angepasst, um mit dem EPS30 vergleichbare Versuchsverhältnisse zu erhalten. Der geplante Versuchsablauf ist in Abbildung 24 dargestellt.



**Abbildung 24** Gewählte Mittelspannungen für die dynamische Ermüdung von EPP.

#### 5.4.5 Mitteldehnung von EPP30 als Funktion der Spannungsamplitude

Der Einfluss der Spannungsamplitude auf die Mitteldehnung von EPP30 wird, wie für EPS30 bereits beschrieben, analog auch für EPP30 bestimmt. Hierzu wird die Mittelspannung auf -66 kPa (66 %  $\sigma_c$ ) gesetzt. Die Spannungsamplituden decken einen Bereich von  $\pm 17$  kPa bis  $\pm 50$  kPa ab. Der geplante Versuchsablauf ist in Abbildung 25 gezeigt.



**Abbildung 25** Gewählte Spannungsamplituden für die Ermüdungsprüfung von EPP.

#### 5.4.6 Mittenkurvenverfahren nach Lazan

Zur Auswertung der Messdaten aus den Hysteresismessungen wird das graphische Verfahren nach Lazan [34] angewendet. Es handelt sich hierbei um die Auswertung der für das Material charakteristischen Hysteresisschleifen in sogenannter Bildform.

Die noch analogen Messsignale der Kraftmessdose und des Wegsensors werden zunächst mit zwei getrennten Analog-Digital-Konvertern (engl. ADC) phasensynchron abgetastet und als diskrete Stützpunkte abgespeichert. Die Abtastrate (engl. sampling frequency) beträgt 5000 Hz und ist durch das verwendete Steuergerät (Typ 8400, Schenck/Instron, Darmstadt, Deutschland) beschränkt. Ein im Regelprozessor direkt nachgeschaltetes Anti-Aliasfilter, welches als Tiefpassfilter 5. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 1000 Hz ausgelegt ist, filtert ungewünschte hochfrequente Signalanteile bereits bei der Messdatenerfassung aus den Nutzsignalen heraus [41].

Bedingt durch das Anti-Alias-Filter (1000 Hz) beträgt der zeitliche Abstand zwischen zwei Stützpunkten nun 1 ms. Laut dem WKS-Abtasttheorem (früher Nyquist-Theorem) von Whittaker, Kotelnikow und Shannon [42, 43] kann somit das Nutzsignal Frequenzinformationen bis maximal 500 Hz sicher enthalten. Im vorliegenden Fall wird mit einer Prüffrequenz von maximal 5 Hz gemessen. Ein gesamtes Schwingenspiel dauert somit 200 Millisekunden. Eine Hysteresisschleife wird aufgrund des mit 1000 Hz arbeitenden Anti-Aliasfilters demnach in maximal 200 Stützpunkte zerlegt. Die Prüffrequenz hat also direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Messsignale. Je langsamer die Versuche durchgeführt werden, desto mehr diskrete Stützpunkte könnten theoretisch generiert werden.

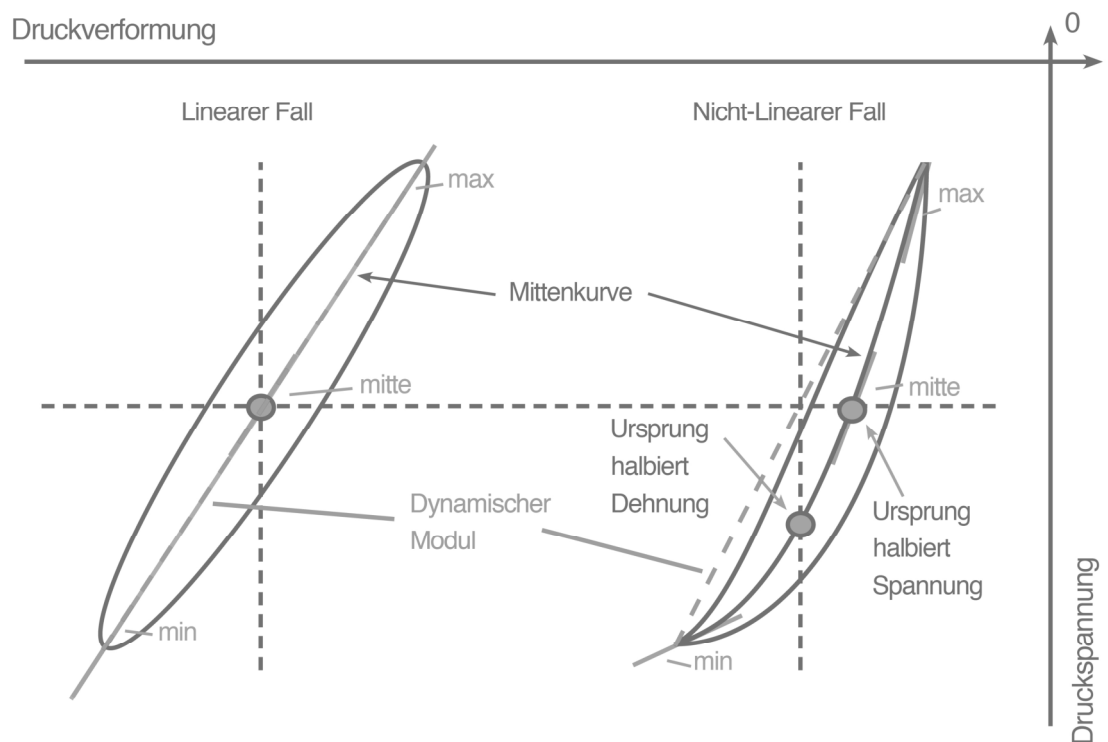
Die eingesetzte Steuersoftware (DynComp, BASF SE, Ludwigshafen, Deutschland) gibt jedoch immer einen reduzierten Datensatz von genau 128 Stützpunkten pro Schwingenspiel für die diskretisierten Kraft- und Deformationssignale aus. Die Arbeitsweise der Reduktionsfunktion ist internes Know-how der BASF und somit nicht bekannt. Aus Erfahrungen im Umgang mit der Software am Lehrstuhl geht hervor, dass eine Anzahl von 128 Stützpunkten pro Hysteresisschleife bereits ausreicht, um alle für die Polymere relevanten Anteile im Messsignal qualitativ ausreichend zu beschreiben. Bei einer maximalen Messfrequenz von 5 Hz enthält die Ausgabe der Messdaten somit Informationen über Frequenzen bis zur 64. Oberwelle (= 320 Hz) sicher, was ausreichend ist. Fehler durch das Filtern und Reduzieren der Stützpunkte sind somit vernachlässigbar klein.

Wie bereits beschrieben, werden die bei den Hysteresismessungen aufgenommenen transienten Zeit- und Wegsignale direkt nach der Aufnahme in einer nachgeschalteten Funktion im Mess-PC digital auf diskrete Stützpunkte reduziert. Die so gewonnenen Stützpunkte werden nach dem Mittenkurvenverfahren, welches auf der Veröffentlichung von Lazan [34] beruht, weiterverarbeitet. Zuerst werden die diskreten Stützpunkte der Kraft- und Wegsignale eines Schwingenspiels in einem gemeinsamen Diagramm gegeneinander aufgetragen, wodurch sogenannte Lissajous-Figuren entstehen. Die Abszisse zeigt jeweils die Größe „Deformation“ (in mm oder %). Die Ordinate beschreibt analog die Größe „Kraft“ (in N oder MPa).

Im linearen Fall und bei kleinsten Belastungsamplituden ist die Signalantwort eines sinusförmig angeregten Partikelschaums wieder ein sinusförmiges Signal derselben Frequenz. Die Hysteresisschleife ist in diesem Fall eine symmetrische Ellipse. Wird ein Partikelschaum

über seine lineare Grenze hinaus belastet, so wird das Antwortsignal auch höherfrequente Signalanteile enthalten. Die Formänderung der Hysteresisschleife beschreibt dann z. B. scharfe Spitzen an den Umkehrpunkten und einen nicht symmetrischen, bananenförmigen Verlauf.

Erkenntnisse aus der Formänderung der Hysteresisschleife und der Mittenkurve können sogenanntes nichtlineares Verhalten der Partikelschäume aufzeigen. Hierzu soll erstmals der Ursprung der Mittenkurve als Indikator verwendet werden. Der Ursprung der Mittenkurve ist im nichtlinearen Fall nicht mehr auf einen Punkt konzentriert. Durch die nichtlinearen Anteile kommt es zu einer Asymmetrie der Hysteresisschleife. Nun können zwei unterschiedliche Punkte, ein krafthalbierender und ein weghalbierender, auf der Mittenkurve definiert werden. Durch den Abstand dieser beiden Punkte kann direkt eine qualitative Aussage darüber getroffen werden, ob sich ein Material noch im linearen oder schon im nichtlinearen Bereich befindet (sh. Abbildung 26).



**Abbildung 26** Lineares (links) und nichtlineares (rechts) viskoelastisches Materialverhalten (schematisch).

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Übergangs vom linearen zum nichtlinearen Materialverhalten ergibt sich, wenn die Ableitung der Mittenkurve an jeder Position gebildet wird. Ist die Ableitung der Mittenkurve über den gesamten Verlauf konstant, so ist von linearem Materialverhalten auszugehen. Kommt es jedoch zu Veränderungen in der Mittenkurve innerhalb eines Schwingspiels, so wird dies durch nichtlineare Anteile begründet. In Abbildung 26 ist die Bildung des dynamischen Moduls und der Ableitung der Mittenkurve an der oberen, mittleren und unteren Position der Mittenkurve einmal für linear-viskoelastische (links) und einmal für nichtlinear-viskoelastische (rechts) Druckbelastung schematisch gezeigt.

## 5.5 Modellierung des dynamischen Kriechens

In Kapitel 2.2 über viskoelastische Modellierung ist bereits eine Einführung über Maxwell- und Voigt-Elemente gegeben. Um die mittels servo-hydraulischer Prüfung ermittelte mittlere Deformation (= dynamisches Kriechen) als Funktion der Mittelspannung und Spannungsamplitude modellhaft zu beschreiben, wird ein generalisierter Ansatz nach Gleichung (6) (S. 27) angewendet. Nach Thielen et al. [35] ist zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens von zellulären Strukturen ein Modell mit höchstens drei unabhängigen Maxwell-, bzw. Kelvin-Voigt-Elementen notwendig.

Die Bestimmung der einzelnen für die modellhafte Beschreibung notwendigen Koeffizienten erfolgt mittels der bereits existierenden Regressionsfunktionen ExpDec1, ExpDec2 und ExpDec3 von Origin (Origin Pro 8.5, Originlab Corporation, Northampton, MA, USA). Bei den Regressionsfunktionen handelt es sich um einen Ansatz nach den bereits beschriebenen Gleichungen (4) und (7) (Seiten 26 und 28). Die resultierenden Koeffizienten werden gezielt in Abhängigkeit der Mittelspannung und der Spannungsamplitude ermittelt, so dass eine Extrapolation der Koeffizienten für die einzelnen Lastfälle möglich wird. Die phänomenologische Modellierung der Mitteldehnung hat zum Ziel, das mechanische Verhalten von EPS30 und EPP30 auch für noch nicht geprüfte Bereiche vorherzusagen.

## 6 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse aus den bereits beschriebenen Versuchen werden in den nächsten Abschnitten diskutiert. Zunächst wird auf die Besonderheit in der Morphologie der Partikelschäume eingegangen. Die mechanischen Untersuchungen bei langsamer Belastung schließen sich diesem Abschnitt direkt an. Anschließend werden Hysteresismessungen gezeigt, die die Mitteldehnung als Funktion der Mittelspannung und Spannungsamplitude beschreiben. Schließlich werden mechanische Modelle auf Basis von generalisierten Kelvin-Voigt-Ansätzen verwendet, um das Ermüdungsverhalten der Partikelschäume zu modellieren.

Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden zur Veröffentlichung angenommen in „e-Polymers“.

### 6.1 Morphologie

Die Dichte von EPS30 liegt im Mittel bei  $27 \text{ kg/m}^3$ . Das EPP30 liegt in einer Dichte von  $30 \text{ kg/m}^3$  vor (sh. Tabelle 2). Bei der Verteilung der Zelldurchmesser innerhalb der Schaumpartikel hingegen ergibt sich für jeden Partikelschaum ein eigenständiges Bild. Die Zelldurchmesser innerhalb eines Schaumpartikels aus EPS30 sind in ihrer Größe radial nach außen abnehmend. Hingegen ist beim EPP30 eine stochastische Verteilung der Zelldurchmesser über den Querschnitt eines Schaumpartikels erkennbar.

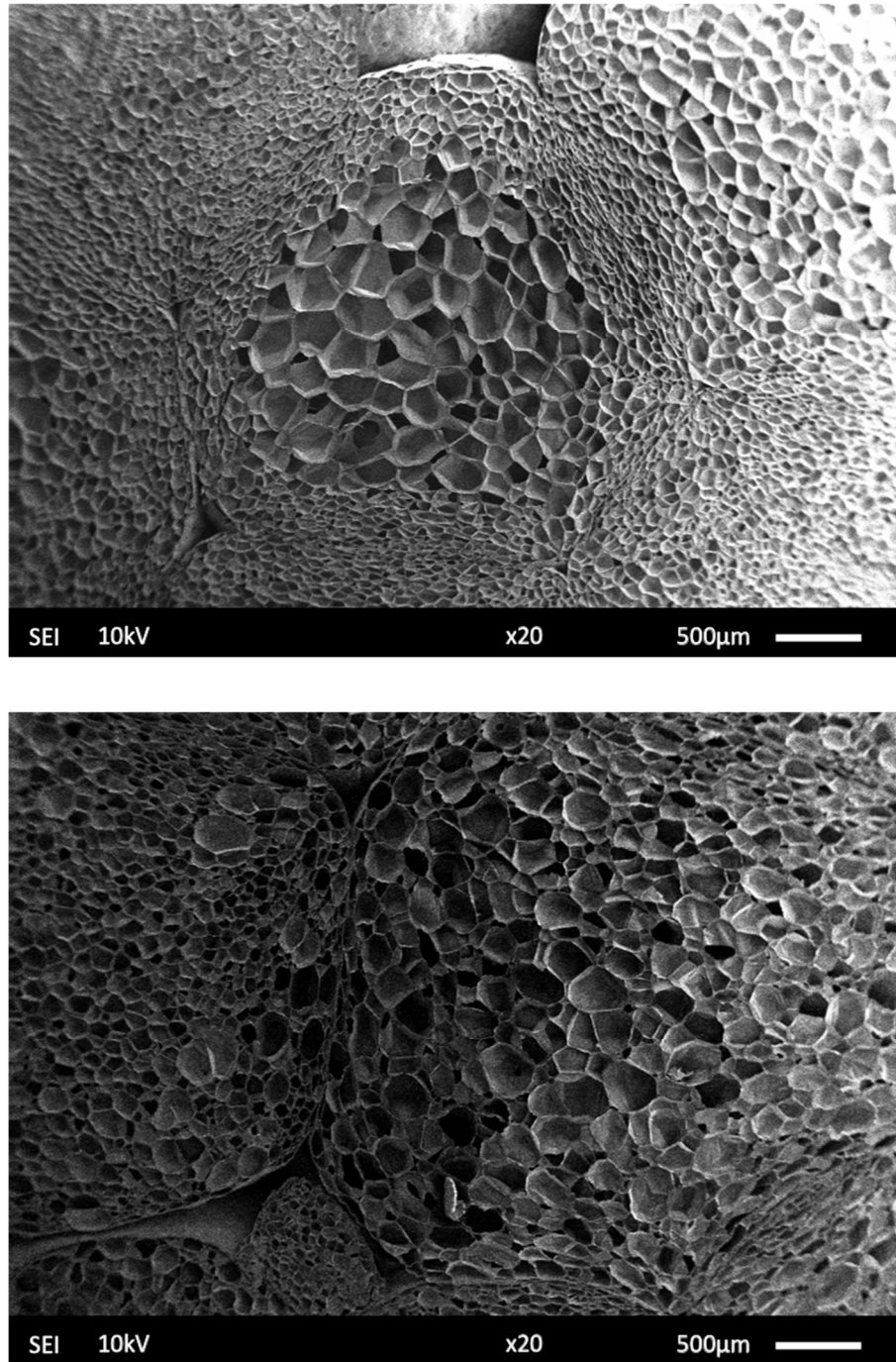
**Tabelle 2** Dichte der verwendeten Partikelschäume.

Material	Dichte [ $\text{kg/m}^3$ ]	
	(Mittelwert $\pm$ Standardabweichung)	
EPS30	27,1	$\pm 0,07$
EPP30	30,1	$\pm 0,08$

Eine Übersichtsaufnahme aus dem Raster-Elektronen-Mikroskop zeigt die innere Morphologie der verwendeten Partikelschäume exemplarisch in Abbildung 27, einmal für EPS30 (oben) und für EPP30 (unten). Die geringe, nur um 20 x betragende Vergrößerung stellt die



minimale Vergrößerungsstufe des REM dar, bei der die verwendete Blende den Elektronenstrahl gerade nicht abdunkelt.



**Abbildung 27** Querschnitt der Partikelschäume im REM. Oben: EPS30. Unten: EPP30.

### 6.1.1 Zusammenfassung

Die Dichte ist für beide Partikelschäume gleichmäßig und liegt innerhalb der festgelegten Spezifikation von 30 kg/m<sup>3</sup>. Es gibt keine signifikanten Abweichungen innerhalb eines Materials. Die Bestimmung der Morphologie zeigt weiterhin keine Abweichungen in der Anzahl der Schaumpartikel pro Volumeneinheit. Die Verteilung der Zelldurchmesser jedoch ist bei EPS30 radial abnehmend und bei EPP30 eher stochastisch. Somit sind beide Partikelschäume ohne Einschränkung zunächst als verwendbar einzustufen.

## 6.2 5-fach-Prüfstempel

Ein neu konstruierter Prüfstempel wird erstmals eingesetzt, der die Druckprüfung von bis zu fünf Proben gleichzeitig auf der Universalprüfmaschine und auf der servo-hydraulischen Prüfmaschine erlaubt (sh. Abbildung 18, s. 38). Es handelt sich dabei um einen Druckstempel mit einem Durchmesser von 100 mm. In diesen Druckstempel sind 25 mm lange quadratische Nuten einer Tiefe von lediglich 0,1 mm gefräst. Diese Vertiefungen verhindern ein unkontrolliertes Wandern der Probe bei den Ermüdungsversuchen.

Ziel bei der Verwendung des neuen Tools ist, die relativ lange Versuchsdauer der bisher zeitintensiven Dauerversuche auf ein wirtschaftliches Maß zu reduzieren. Ein konkretes Beispiel soll den Vorteil des Prüfstempels aufzeigen: Eine Einzelprüfung von 5 Proben über 1 Million Zyklen bei 5 Hz würde rund 278 h Zeit in Anspruch nehmen. Die gleichzeitige Vermessung von 5 Proben nimmt dagegen nur rund 56 h Zeit in Anspruch. Voraussetzung ist, dass das Ausgangsmaterial hinreichend homogen ist. Dies wird noch im Abschnitt über die quasi-statische Prüfung näher diskutiert. Unter diesen Umständen sollte bei der Prüfung mit multiplen Proben simultan keine Veränderung der auf den Querschnitt bezogenen Ergebnisse, wie z. B. der Mittelspannung oder der Mitteldehnung, detektierbar sein.

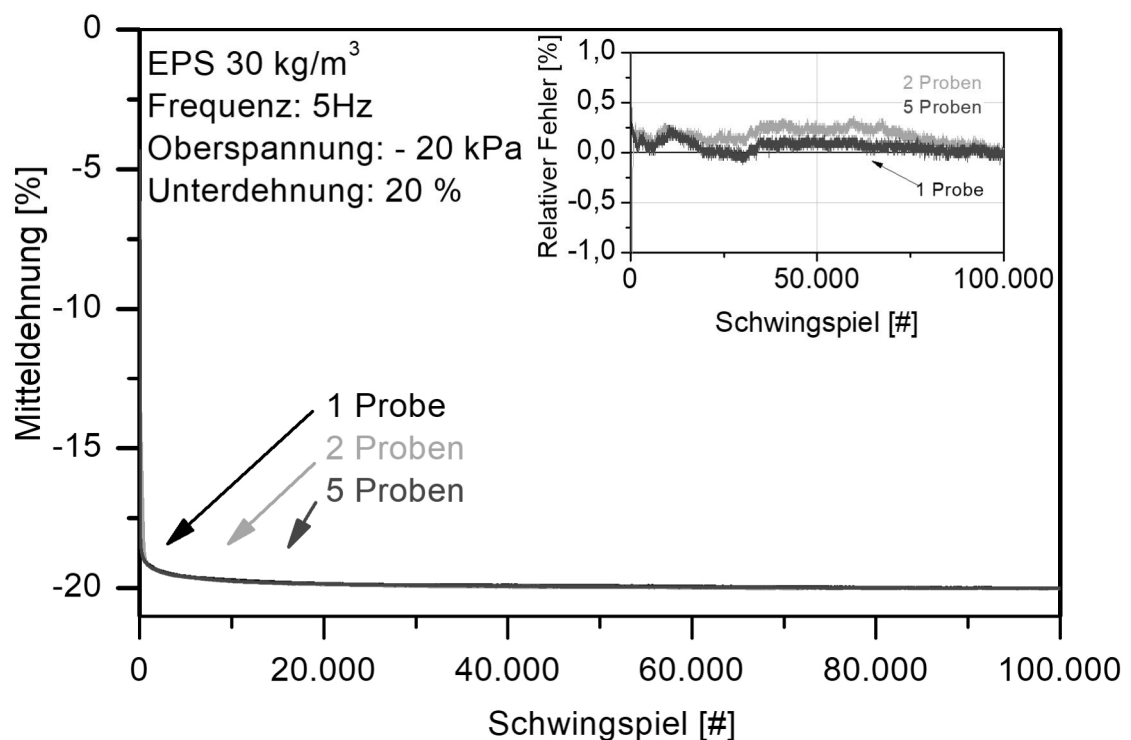
Zum Beweis der Arbeitshypothese werden verschiedene Anzahlen an Prüfkörpern gleichzeitig unter identischen Bedingungen getestet. Dies soll beispielhaft für EPS30 gezeigt werden. Hierzu ist in Abbildung 28 die Mitteldehnung über die Anzahl der Schwingspiele als Funktion der Anzahl der gleichzeitig gemessenen Prüfkörper aufgetragen. Die Messung wird mit einem (schwarz), zwei (orange) oder fünf (blau) gleichzeitigen Prüfkörpern durchgeführt.

Die Mitteldehnungen der einzelnen Versuche liegen nahezu vollständig aufeinander. Es ist dabei nahezu kein Unterschied feststellbar, ob der Versuch lediglich mit einem oder fünf Probekörpern gleichzeitig durchgeführt wird. Somit lautet die Schlussfolgerung, dass sich die Proben unter dynamischer Beanspruchung gleichmäßig homogen verdichten.

Um die homogene Verdichtung zu verdeutlichen, wird die ermittelte Mitteldehnung bei der Prüfung von nur einem Probekörper im Folgenden als Referenz herangezogen. Im Ausschnitt rechts oben in Abbildung 28 ist diese als schwarze Linie gezeigt. Die Mitteldehnungen der Versuche mit 2 (orange) und 5 (blau) Probanden sind als relativer Fehler zur

Messung mit einer Probe eingezeichnet. Dieser relative Fehler ist während der gesamten Prüfdauer stets unter 0,3 %. Das bedeutet, das mechanische Verhalten der Proben ist nach außen hin identisch, auch wenn mehrere Probanden gleichzeitig geprüft werden. Dies ist ein Beweis für die Richtigkeit der Annahme, dass mit mehreren Prüfkörpern gleichzeitig gemessen werden darf. Die homogene Abnahme in der Mitteldehnung zeigt folglich, dass die relative Höhenänderung aller Probanden ebenfalls homogen ist.

Unter der Voraussetzung, dass die Führung des Prüfkolbens gewährleistet ist, spricht nichts gegen die Verwendung von mehreren Prüfkörpern gleichzeitig. Der Vorteil ist, dass fünf Prüfkörper gleichzeitig dieselben mechanischen Deformationen erfahren. Dies ist bei der Ermittlung der Einflüsse z. B. verschiedener Medien und Umgebungsbedingungen von Vorteil.



**Abbildung 28** Mitteldehnung von EPS30 als Funktion der Anzahl gleichzeitig gemessener Prüfkörper.

Zu beachten ist jedoch, dass das Kraftsignal nun als Summensignal zu verstehen ist. Ferner muss darauf geachtet werden, ob eine Probe vorzeitig versagt. Sollte dieser Fall tatsächlich eintreten und eine Probe ausfallen, würden sich aber steifigkeitsbezogene Kenngrößen über

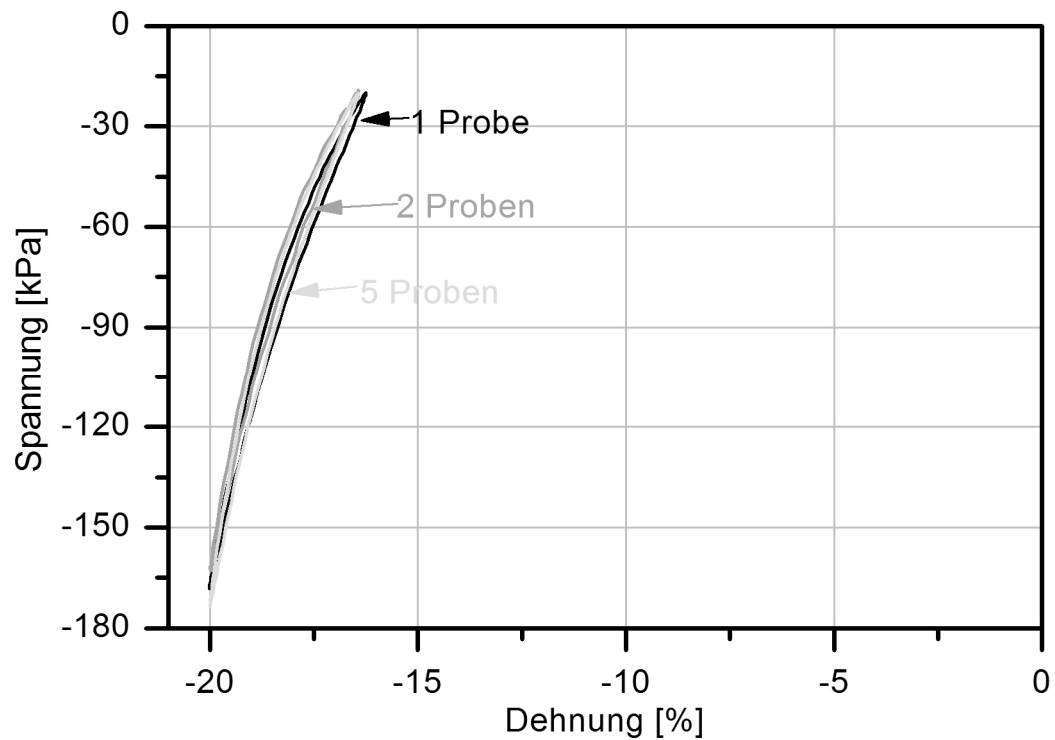
einen kurzen Zeitraum stark verändern. Somit könnte eine Fehlmessung identifiziert werden. Im vorliegenden Fall ist bei keiner Messung ein solcher Fall eingetreten. Dies lässt sich auf den Versagensmechanismus der Partikelschäume zurückführen, denn die hier verwendeten Partikelschäume versagen unter Druck nicht plötzlich, sondern zeigen lediglich eine hohe plastische Deformation.

Dass die Prüfung mit mehreren Prüfkörpern gleichzeitig auch bei Hysteresismessungen möglich ist und darüber hinaus sinnvolle Ergebnisse liefert, soll am Beispiel von Hysteresisschleifen von EPS30 gezeigt werden. EPS30 reagiert sehr empfindlich auf die Druckbelastung und zeigt z. T. sehr hohe plastische Deformationen. EPS30 eignet sich somit hervorragend als Benchmark zur Überprüfung der Arbeitshypothese.

Abbildung 29 zeigt beispielhaft Hysteresisschleifen von EPS30 nach 1.000 Schwingspielen bei einer Prüffrequenz von 1 Hz in einem gemischt geregelten Spannungs-Dehnungs-Versuch (Unterdehnung 20 %, Oberspannung - 20 kPa). Zu sehen sind die Hysteresisschleifen bei gleichzeitiger Verwendung von einem (schwarz), zwei (orange) und fünf (grün) Druckproben gleichzeitig. Da die Hysteresisschleifen der Proben aufeinanderliegen, was auch so zu erwarten war, bekräftigt dies die aufgestellte Hypothese weiter.

Fehlerbetrachtung: Die Bestimmung der Probengeometrie erfolgt mittels Messschieber. Die Genauigkeit dieser Messung kann mit 0,5 mm angegeben werden. Daraus resultiert ein relativer Fehler von 2 % bei der Bestimmung der Kantenlänge. Da für die Ermittlung der Regelgröße Kraft aber die Querschnittsfläche benötigt wird, muss der Gesamtfehler der Querschnittsbestimmung aufgrund der Fehlerfortpflanzung mit insgesamt 4 % angegeben werden. Die beobachteten Abweichungen liegen jedoch innerhalb dieses Fehlerfensters.

Weiterhin werden die Parameter des PID-Reglers während dieser Versuche konstant gehalten. Da jedoch bei fünf Proben gleichzeitig auch die fünffache Nennkraft anliegen muss, kann der PID-Regler nicht für alle Lastfälle optimal eingestellt sein. Dies erklärt die restlichen Abweichungen zwischen den Hysteresisschleifen untereinander.



**Abbildung 29** Hysteresisschleifen von EPS30 als Funktion der gleichzeitig geprüften Prüfkörper.

### 6.2.1 Zusammenfassung

Es kann gezeigt werden, dass es möglich und sinnvoll ist, die zeitintensiven Dauerversuche mit mehreren Prüfkörpern gleichzeitig durchzuführen. Dies gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die Homogenität des Ausgangsmaterials gegeben ist und in vorherigen Untersuchungen bestätigt wurde. Ferner ist bei der Bestimmung der Probengeometrie und der Abstimmung der Regelung auf den jeweiligen Lastfall größte Sorgfalt zu legen.

### 6.3 Quasi-statische Druckeigenschaften

Quasi-statische Untersuchungen helfen das komplexe Materialverhalten von Partikelschäumen mit vergleichsweise wenig Zeitaufwand unter konstant langsamer Deformation aufzudecken. Außerdem können aus diesen Untersuchungen wichtige Belastungsbereiche abgeleitet werden, die für die spätere dynamische Prüfung von besonderer Bedeutung sind.

#### 6.3.1 Einfluss der Probenanzahl

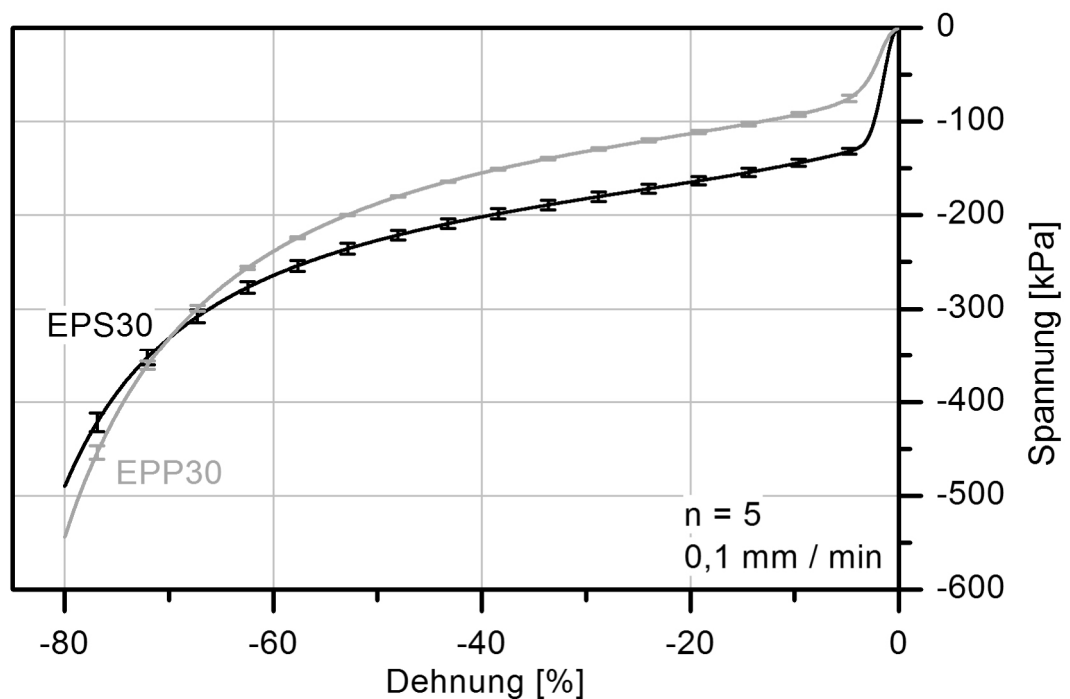
Ziel dieses Abschnittes ist die Bestimmung einer Probenanzahl, die so gering wie möglich, aber noch so hoch wie nötig ist, um ein statistisch gesichertes Ergebnis zu erhalten. Damit kann die Dauer der Ermüdungsversuche wirtschaftlicher gestaltet werden. Abbildung 30 zeigt einen typischen Verlauf einer (Druck)-Spannungs-Dehnungs-Kurve von EPS30 und EPP30 (mit einer Dichte von  $30 \text{ kg/m}^3$ ), aufgenommen bei einer Deformationsrate von  $0,1 \text{ mm/min}$ . Diese und die im Folgenden gezeigten Abbildungen weisen alle eine wichtige Gemeinsamkeit auf: Der Ursprung der Spannungs-Dehnungs-Kurve ist in die rechte obere Ecke verlegt, was den Charakter des Druckversuches verdeutlicht. Auf der Abszisse ist stets die ingenieurmäßige Dehnung (= relative Änderung der Probenhöhe bezogen auf die Ausgangshöhe) und auf der Ordinate die ingenieurmäßige Spannung (= momentaner Kraftwert bezogen auf den Ausgangsquerschnitt) aufgetragen.

Die drei für polymere Schäume charakteristischen Deformationsgebiete (Linearer Bereich, Plateau und Verdichtung) sind auch bei EPS30 und EPP30 präsent und dem Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve aus Abbildung 30 klar zu entnehmen. Linearer Bereich, Plateau und Verdichtung grenzen sich jedoch nicht klar voneinander ab. Der Übergang zu jeweils benachbarten Bereichen ist stets fließend.

Unter der Voraussetzung einer homogenen Verschweißung der Schaumpartikel untereinander und einer geringen Streuung der morphologischen Eigenschaften (Anzahl an Schaumpartikeln pro Volumeneinheit, Zelligkeit innerhalb eines Schaumpartikels, etc.) kann eine Reduktion der Probenanzahl auf lediglich fünf Prüfkörper präzise Ergebnisse mit einer relativ kleinen Streuung liefern. Die in Abbildung 30 gezeigten Spannungs-Dehnungs-Kurven von EPS30 und EPP30 sind als Mittelwert aus fünf Einzelmessungen zu sehen. Die gemessene Standardabweichung zeigt, dass eine Anzahl von fünf Proben für ein statistisch

sicheres Ergebnis ausreicht, da der erwartete Effekt der Formänderung deutlich größer als die gezeigte Streubreite bei fünf Messungen ist.

Die geringe Streuung der Messwerte ist insbesondere der Tatsache geschuldet, dass die verwendeten Probekörper aus der industriellen Fertigung stammen und somit über ein hohes Maß an „Gleichheit“ hinsichtlich Morphologie und Probendimension verfügen. Abschließend ist festzuhalten, dass für spätere Vergleichsmessungen auch eine Probenanzahl von fünf Stück gewählt wird. Dies reduziert den zeitlichen Aufwand der Messungen sowohl bei der quasi-statischen als auch bei der zyklischen Ermüdungsprüfung.



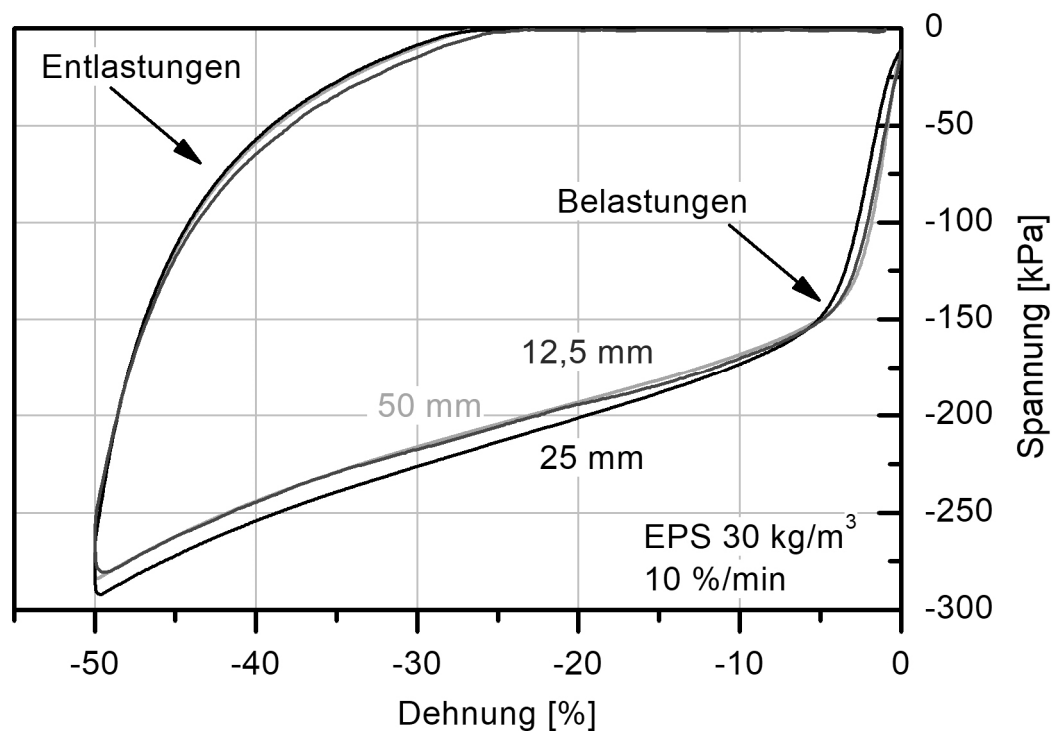
**Abbildung 30** Quasi-statisches Verhalten von EPS30 (schwarz) und EPP30 (orange).

### 6.3.2 Einfluss der Probengeometrie

Gezielt den Einfluss der Anzahl der Schaumpartikel auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten aufzudecken, ist Ziel dieses Abschnittes. Dies ist notwendig, da mit anderen als in der Norm vorgeschriebenen Probendimensionen gemessen werden soll. Abbildung 31 zeigt die Mittelwerte der Spannungs-Dehnungs-Kurven von EPS30 als Funktion der Kantenlängen



bei einer konstanten, auf die Probengeometrie angepassten Deformationsrate von 10 %/min. Der gesamte erste Be- und Entlastungszyklus unter Druckbeanspruchung ist abgebildet und zeigt, dass die Variation der Kantenlänge zu keiner signifikanten Veränderung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von EPS30 führt. Der Verlauf der Kurven ist nahezu identisch und die Abweichungen liegen innerhalb des systematischen Fehlers durch die Bestimmung der Kantenlänge (vgl. auch Abbildung 30).

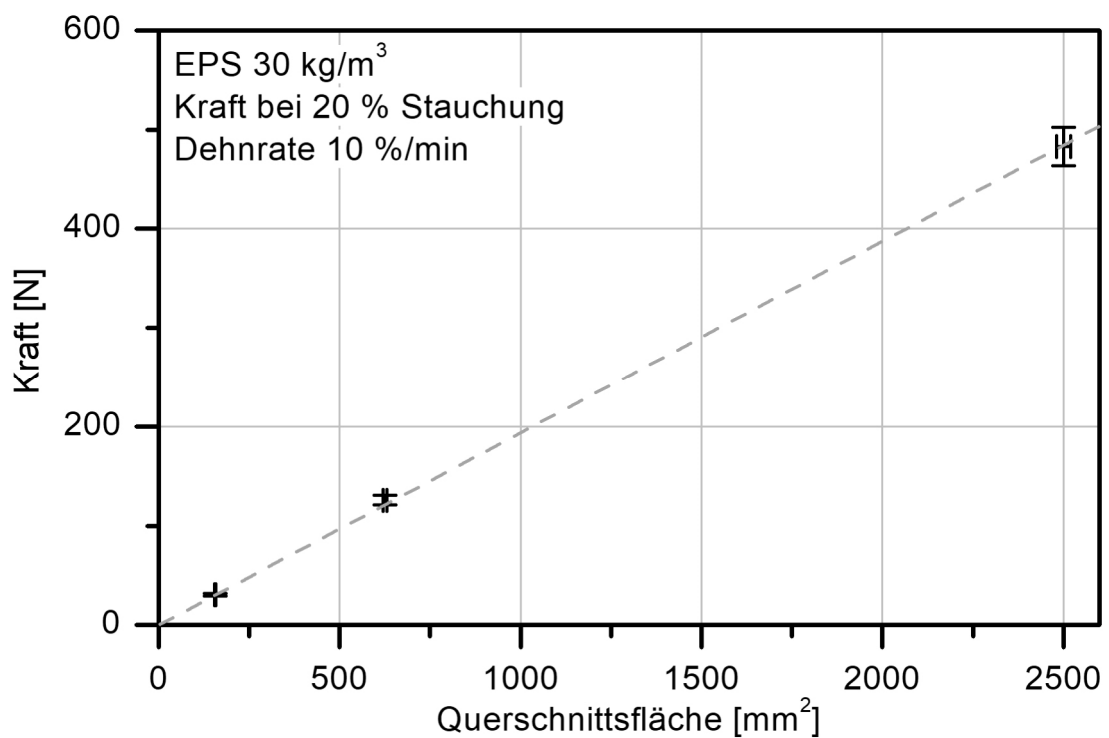


**Abbildung 31** Spannungs-Dehnungs-Verhalten von EPS als Funktion der Kantenlänge.

Fehlerbetrachtung: Der manuelle Zuschnitt der Proben und die Messung der Seitenlängen mittels Messschieber stellen mögliche Fehlerquellen dar, die zu den geringen Abweichungen im Spannungs-Dehnungs-Verhalten führen können. Außerdem wird durch die Präparation der Proben die Oberfläche eingeritzt, so dass hierdurch Defekte in die Probe eingebracht werden können.

Zur weiteren Erhärtung der Hypothese, dass die gezeigten Abweichungen sich allein auf den Messfehler der Probengeometrie beschränken, wird die gemessene Kraft bei 20 % Verdichtung als Funktion des Probenquerschnitts betrachtet (sh. Abbildung 32). Die angedeutete

Gerade (gestrichelt, orange) zeigt den rechnerischen Verlauf der Kraft als Funktion der Querschnittsfläche bei idealer Vermessung der Probanden. Die Messpunkte zeigen die ermittelte Fehlergröße sowohl für den Querschnitt (x-Fehler) als auch die daraus resultierende Berechnung der zugehörigen Kraft (y-Fehler). Da die Fehlerbalken noch auf der Geraden liegen, scheint kein weiterer systematischer Fehler die Messung zu verfälschen. Die Größe der Fehlerbalken entspricht einem relativen Fehler von weniger als 4 %. Folglich kann eine sichere Bestimmung der Probenlänge mit einem Fehler von 0,5 mm angegeben werden. Dieser Wert erscheint plausibel, da die Bestimmung der Kantenlänge der weichen Probanden mittels Messschieber ein gewisses Spiel von 0,5 mm zeigt.



**Abbildung 32** Kraft als Funktion des Querschnitts von EPS30.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Probengröße selbst keinen signifikanten Einfluss auf die Spannungs-Dehnungs-Kurve hat, wenn die Präparation der Proben und deren Vermessung optimal sind. Es ist ferner davon auszugehen, dass diese Beobachtung auch für die dynamische Ermüdung gilt. Dies ist insofern von wirtschaftlichem Interesse, als es nun möglich ist, kleinere Proben, als es die Norm vorschreibt, sinnvoll im quasi-statischen

als auch im Bereich der Ermüdung zu testen. Insbesondere bei Materialneu- und -weiterentwicklungen kann dies von wirtschaftlichem Interesse sein.

### 6.3.3 Einfluss der Prüfgeschwindigkeit

Allgemein bekannt ist, dass das mechanische Verhalten von Polymeren stets geschwindigkeitsabhängig ist. Im folgenden Abschnitt soll dies für die verwendeten Partikelschäume gezeigt werden.

#### 6.3.3.1 EPS30

Ziel dieses Abschnittes ist die Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von EPS30 unter Druck als Funktion der Prüfgeschwindigkeit zwischen 0,1 und 50 mm/min. Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse der aus fünf Einzelmessungen gemittelten Spannungs-Dehnungs-Verläufe für EPS30 als Funktion der Deformationsgeschwindigkeit.

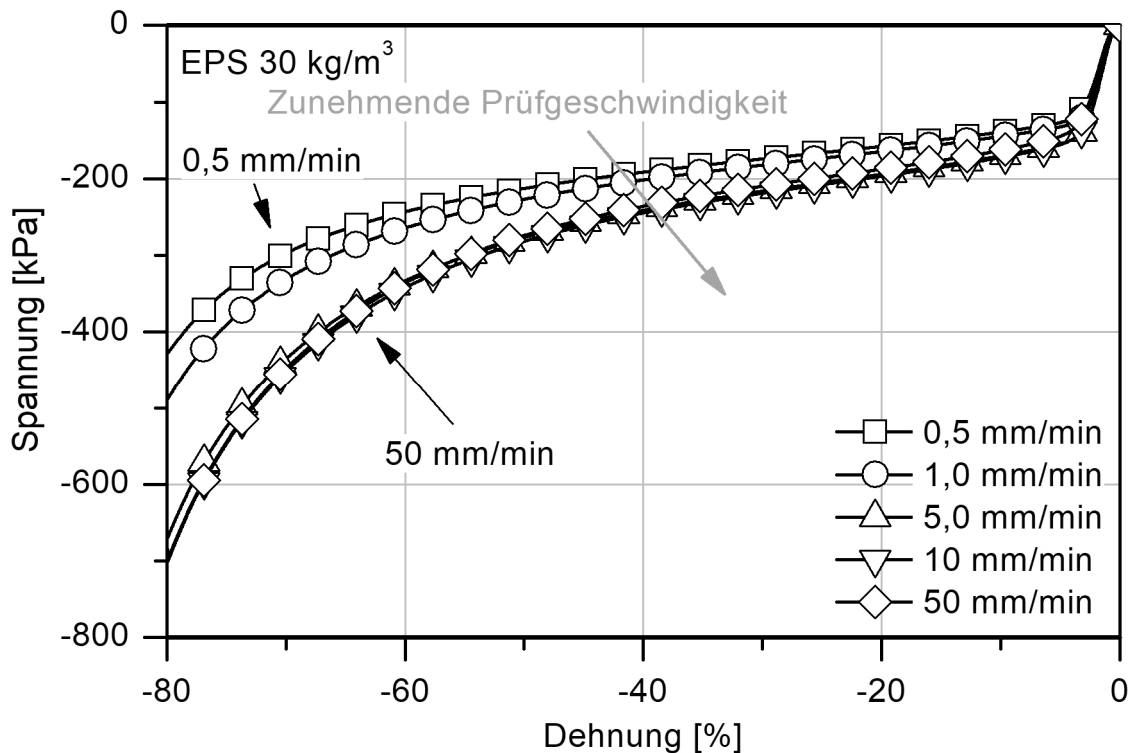
Der E-Modul, bestimmt als Steigung der Sekante zwischen 0,25 und 0,5 % Deformation, steigt im gewählten Geschwindigkeitsfenster nur unbedeutend an. Dies ist zu erwarten, da der abgedeckte Prüfgeschwindigkeitsbereich noch relativ schmal ist. Eine deutliche Erhöhung im E-Modul ist nach Boiux et al. [29] erst nach Überschreiten einer Prüfgeschwindigkeit von mehr als 500 mm/min zu erwarten.

Der Übergang vom Bereich der linearen Deformation zum Plateau hingegen ist im gewählten Prüffenster bereits stark geschwindigkeitsabhängig. Das Knie, definiert als der Schnittpunkt aus der Steigung der Tangenten des Plateaus und der Steigung der Tangenten des linearen Bereichs, steigt mit zunehmender Geschwindigkeit in Richtung größerer Spannungswerte an.

Der Anstieg im Plateau ist ebenfalls von der Prüfgeschwindigkeit abhängig. Die Steigung des Plateaus ist umso steiler, je größer die Prüfgeschwindigkeit ist.

Die Druckspannungen bei 80 % relativer Verdichtung zeigen eine starke Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit. Werden die langsamste und die schnellste Prüfgeschwindigkeit verglichen, so ergeben sich Spannungswerte von - 410 kPa zu - 700 kPa bei maximaler gezeigter Verformung. Die Zunahme der Spannung als Funktion der Prüfgeschwindigkeit

beträgt rund 70 %. Eine mögliche Erklärung für die gezeigten Effekte stellt die Dehnverfestigung und die schnelle Kompression des eingeschlossenen Zellgases dar. Boiux et al. zeigten dies bereits ausführlich für EPP [29].



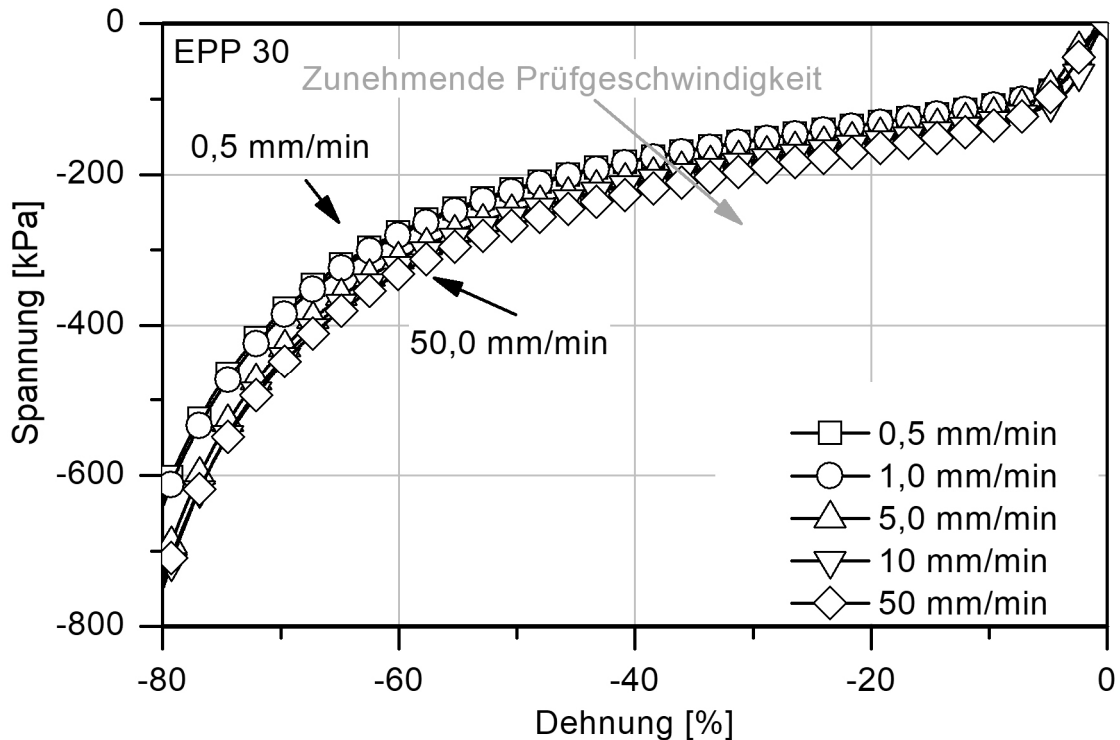
**Abbildung 33** Spannungs-Dehnungs-Kurve von EPS als Funktion der Prüfgeschwindigkeit.

### 6.3.3.2 EPP30

Für EPP30 kann ebenfalls eine Abhängigkeit des Verlaufs der Spannungs-Dehnungs-Kurve von der Deformationsgeschwindigkeit gezeigt werden (sh. Abbildung 34). Die bereits für EPS30 gezeigte Dehnverfestigung ist auch bei EPP30 präsent, jedoch ist die Ausprägung dieses Effekts deutlich geringer.

Werden die Druckspannungen bei 80 % Verdichtung zwischen der langsamsten (- 600 kPa) und der schnellsten (- 720 kPa) Prüfgeschwindigkeit verglichen, so beträgt die Zunahme nur rund 20 %. Der Anstieg ist somit nicht so stark ausgeprägt wie bei EPS30. Dies kann mit dem Unterschied in der Molekülstruktur erklärt werden. Die Polymerketten der amorphen

Bereiche von EPP30 sind bei Prüftemperatur bereits in Schmelze. Sie gleiten somit leichter voneinander ab, wodurch der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit reduziert wird.



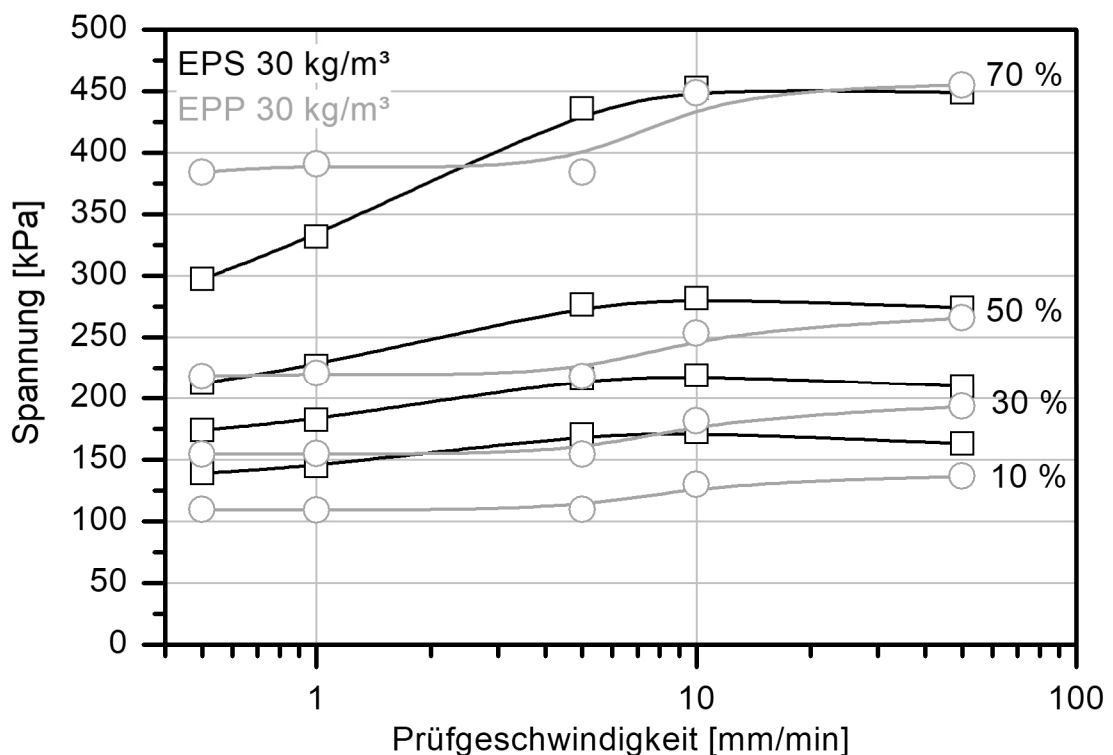
**Abbildung 34** Spannungs-Dehnungs-Kurve von EPP als Funktion der Prüfgeschwindigkeit.

### 6.3.3.3 Zusammenfassung

Für die Prüfung von EPS30- und EPP30-basierten Partikelschäumen kann eine Deformationsgeschwindigkeit zwischen 5 mm/min und 50 mm/min gewählt werden, da in diesem Bereich der grundsätzliche Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve nahezu identisch ist. Es treten in diesem Geschwindigkeitsbereich keine unerwarteten Phänomene wie z. B. Druckspannungsfließen auf. Zum Vergleich: Die Hysteresismessungen auf der servohydraulischen Prüfmaschine laufen ebenfalls in diesem Geschwindigkeitsbereich ab, wenn eine Prüfung zwischen 2 und 5 Hz angestrebt wird.

Die gezeigten Unterschiede im Materialverhalten zwischen EPS und EPP können auf die unterschiedlichen Zustände der Polymerketten bei Raumtemperatur zurückgeführt werden. EPS befindet sich bei der Prüfung im energieelastischen Zustand. Es ist dadurch spröder, was sich in der höheren plastischen Deformation zeigt. EPP ist bei Raumtemperatur im entropieelastischen Zustand und somit in der Lage, elastische Rückstellungen auszuführen.

In Abbildung 35 ist der Verlauf der Spannung als Funktion der Prüfgeschwindigkeit für die beiden Partikelschäume EPS in schwarz und EPP in orange für die unterschiedlichen Verdichtungsniveaus aufgezeigt. Der Verlauf verdeutlicht das bisher beschriebene grundsätzlich unterschiedliche Materialverhalten.



**Abbildung 35** Spannung als Funktion der Prüfgeschwindigkeit.

EPS zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit bis etwa 5 mm/min. Darüber hinaus ist es unabhängig von der gewählten Messgeschwindigkeit. EPP hingegen zeigt ein bimodales Verhalten: Bei Prüfgeschwindigkeiten bis 5 mm/min ist keine messbare Abhängigkeit der Spannung von der Prüfgeschwindigkeit erkennbar. Ab 10 mm/min erfolgt ein sprunghafter Anstieg, der im weiteren Verlauf jedoch nicht weiter zunimmt.

### 6.3.4 Druckverformungsrest

Krollmann [26] und Horvath [24] zeigten in ihren Arbeiten, dass sich EPS-basierte Partikelschäume bereits unter einer geringen Druckbeanspruchung plastisch deformieren. Bisher ist jedoch noch nicht bekannt, wie sich die plastische Deformation im quasi-statischen Versuch als Funktion der Prüfgeschwindigkeit verhält. Dies wird im folgenden Abschnitt erläutert.

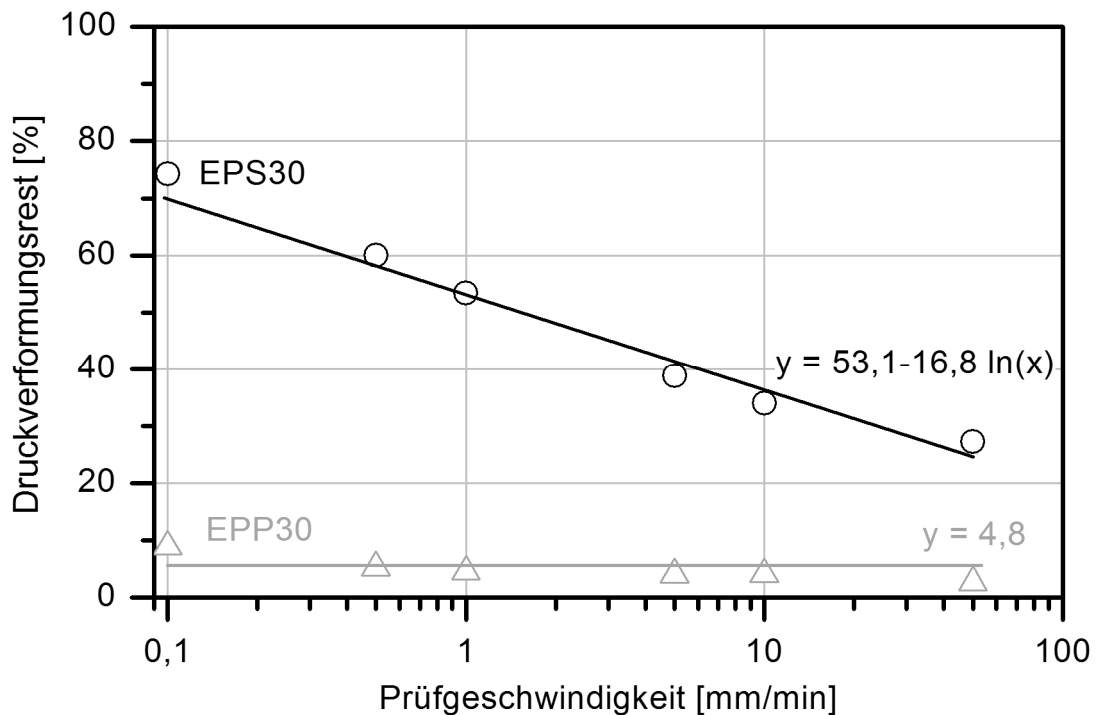
Die sich einstellende plastische Deformation als Folge einer Druckbelastung von 80 % Verdichtung bei variabler Prüfdauer zeigt Abbildung 36 in Form eines angepassten Druckverformungsrestes DVR [%]. Der DVR wird hier lediglich als Begrifflichkeit verwendet, um das Rückstellvermögen der Partikelschäume zu zeigen. Es handelt sich hierbei nicht um den aus dem Fachbereich der Elastomere definierten DVR. Im vorliegenden Fall ist der DVR der Proben nach dem Versuch mit sich anschließender druckfreier Ruhezeit von 24 Stunden definiert. Das bedeutet, die Proben haben sich nach der Belastung wieder maximal entspannt, denn es konnte keine weitere Höhenveränderung auch nach 48 h festgestellt werden.

Ein DVR von 0 % zeigt, dass sich das Material nach der Entlastung vollständig in die Ausgangsform zurückbildet. Ein steigender DVR indiziert eine zunehmende plastische Deformation. Sollte sich ein Material nicht mehr zurückbilden, so ist ein DVR von 100 % anzugeben.

Der DVR von EPS30 (Abbildung 36, schwarz) nimmt proportional mit Zunahme der Prüfgeschwindigkeit ab. Im Umkehrschluss bedeutet dies: Je langsamer die Prüfung durchgeführt wird, desto größer ist die sich einstellende plastische Deformation. Diese Zunahme als Funktion der Prüfdauer bei EPS30 könnte durch das Abgleiten von Molekülketten im Polymer erklärt werden. Dies wird allgemein als sekundäres Kriechen interpretiert.

EPP30 (Abbildung 36, orange) hingegen zeigt nahezu keine plastische Deformation bei gleicher Belastung. Unabhängig von der Prüfdauer stellt sich immer dieselbe plastische Deformation ein. Eine mögliche Ursache hierfür liegt in den Unterschieden bei der Glasübergangstemperatur der beiden Partikelschäume. EPS30 verhält sich bei Raumtemperatur spröde und zeigt somit eine höhere plastische Deformation. Bei EPP30 ist der amorphe Bereich bei Raumtemperatur hingegen bereits hoch beweglich. Die hohen Rückstellkräfte

der teilkristallinen Bereiche und der Aufbau des Polymeren könnten die Erhaltung der Geometrie von EPP30 positiv beeinflussen.



**Abbildung 36** Druckverformungsrest von EPS und EPP als Funktion der Geschwindigkeit.

Durch eine lineare Fitting-Funktion ( $R^2 = 97,5 \%$ ) wird der DVR von EPS30 als Funktion der Prüfdauer erstmals modellierbar. Lediglich bei ganz schnellen Prüfgeschwindigkeiten weicht das Verhalten des Partikelschaums von der Regressionsgeraden leicht ab. Dies liegt mitunter an der hohen Wärmeeinbringung in das Material, wodurch die Beweglichkeit der Molekülketten erhöht wird. Die Zellstege des EPS30 sind nun elastischer und können sich nach der Belastung leichter wieder aufstellen. Zusätzlich wird durch die schnelle Kompriemierung das eingeschlossene Zellgas so schnell verdichtet, dass möglicherweise die dadurch entstehende Wärme nicht vollständig an das Polymer abgegeben wird. Folglich leistet das komprimierte Gas mechanische Arbeit am Partikelschaum.

Da die Modellbildung für EPP30 versagt, scheint es keine Abhängigkeit von der Prüfdauer zu geben. Die Fitfunktion gibt lediglich eine Konstante aus. Zusätzlich konvergiert der Fit nicht, wodurch die Aussagekraft dieses Modells nicht gegeben ist. Somit bleibt offen, ob



hier tatsächlich eine Kausalität vorliegt. Es ist festzuhalten, dass EPP30 eine plastische Deformation von etwa 5 % unabhängig von der Prüfzeit zeigt.

### 6.3.5 Zyklische Belastung ohne Belastungspause

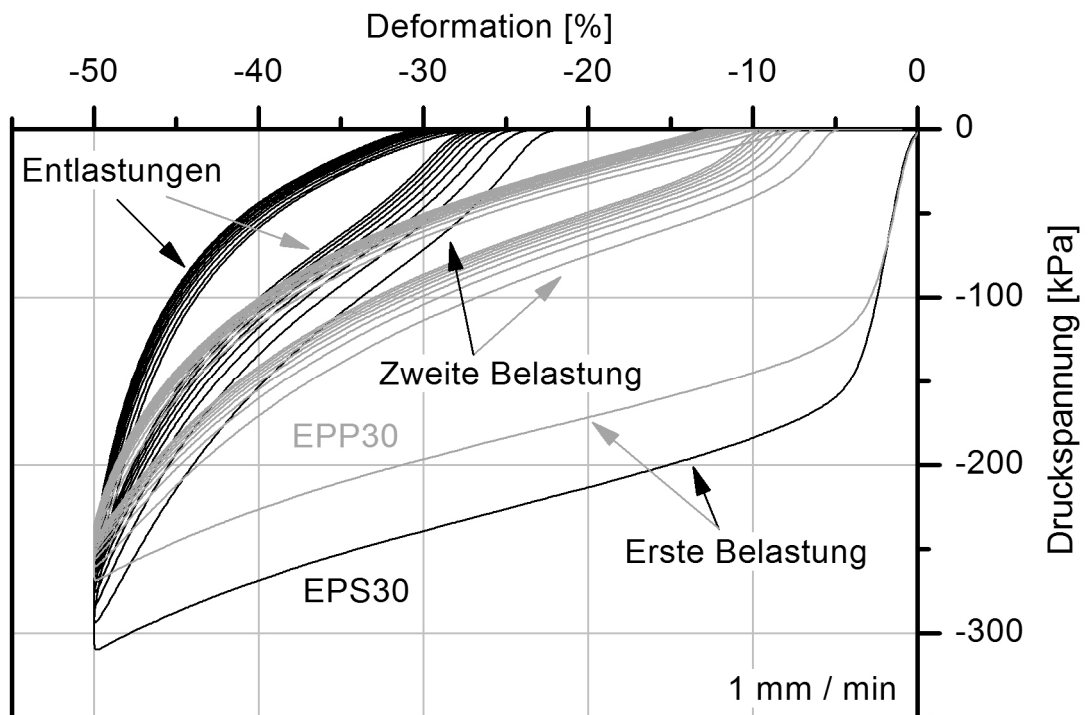
Bereits gezeigt wurde, dass das mechanische Verhalten der Partikelschäume EPS30 und EPP30 abhängig von der Deformationsgeschwindigkeit ist. Ferner konnte gezeigt werden, dass die plastische Deformation von EPS30 als Folge der Belastung mit der Prüfzeit korreliert.

Die quasi-statische zyklische Prüfung von Partikelschäumen hingegen ist von besonderer Bedeutung, da durch die wiederholte Belastung der Prüfkörper das Schaumnetzwerk schnell geschädigt wird und somit die Veränderungen in der Morphologie des Partikelschaums in den mechanischen Eigenschaften sichtbar werden. Zusätzlich zählen diese Versuche als Vorbereitung für die dynamischen Ermüdungsversuche, die auf den Erkenntnissen dieser Versuche beruhen.

Es werden zunächst quasi-statische Ermüdungsversuche mit einer geringen Anzahl von 10 Lastwechseln durchgeführt. Die Versuchsdurchführung erfolgt mit einer Belastung bis 50 % Dehnung mit anschließender Entlastung auf 0 % Dehnung. Dadurch kann die plastische Deformation nach Ende der Prüfzyklen ermittelt werden. Dort, wo die Spannungs-Dehnungs-Kurve erstmalig den Kraftwert 0 N wieder erreicht (= Schnittpunkt der Spannungs-Dehnungs-Kurve mit der Abszisse), wird die plastische Deformation abgelesen.

Der Spannungs-Dehnungs-Verlauf von EPS30 (schwarz) und EPP30 (orange) bei 10-facher Be- und Entlastung ist in Abbildung 37 dargestellt. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven von EPS30 und EPP30 unterscheiden sich in ihrer Form voneinander. Für EPS30 und EPP30 gilt Folgendes gleichermaßen: Während der ersten Verdichtung auf 50 % werden bereits viele Schaumpartikel und somit auch Schaumzellen permanent beschädigt. Dieser Anteil an geschädigten Zellen kann im nächsten Belastungsschritt nicht mehr an der Lastverteilung mitwirken. Damit ist der Unterschied zwischen der ersten und zweiten Belastungskurve zu erklären. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven unterscheiden sich im weiteren Verlauf (Belastungszyklus 2–10) nun untereinander nicht mehr so stark voneinander. Das bereits ge-

schädigte Schaumnetzwerk wird in den konsekutiven Belastungszyklen nicht weiter verdichtet. Es werden nämlich keine neuen Bereiche überlastet, sondern existente Schädigungen immer wieder belastet. Der vorliegende Mechanismus, der diese plastische Deformation erklären könnte, könnte auf das bereits gezeigte sekundäre Kriechen zurückzuführen sein (sh. Abschnitt 6.3.4).



**Abbildung 37** Zyklisches Deformationsverhalten von EPS und EPP.

Im Einzelnen weisen die Partikelschäume aber auch Unterschiede im mechanischen Verhalten auf. EPS30 zeigt die größte plastische Deformation nach dem ersten Belastungszyklus. Es zeigt auch die größte Veränderung in der Spannungs-Dehnungs-Kurve. Es ist davon auszugehen, dass das Schaumnetzwerk hier deutlich stärker in Mitleidenschaft gezogen wird als bei EPP30. Im Unterschied dazu zeigt EPP30 eine deutlich geringere plastische Deformation nach dem ersten Zyklus. Dennoch unterscheidet sich auch hier die Form der Spannungs-Dehnungs-Kurve im weiteren Verlauf von der ersten.

Die Unterschiede im mechanischen Verhalten können einerseits durch die Unterschiede in der Morphologie begründet werden. Vielmehr spielt aber vermutlich der Glaszustand des Polymeren eine wichtige Rolle für das Rückstellvermögen der Partikelschäume.

EPP30 befindet sich bei Raumtemperatur bereits oberhalb seiner Glasübergangstemperatur. Die amorphen Bereiche der Polymerketten sind dadurch mobiler und können sich gegeneinander verdrehen. Die Molekülketten verknäulen sich im entspannten Zustand und liegen ungeordnet vor. Bei der Druckbelastung jedoch werden die Molekülketten verstreckt, wodurch sie einen Zustand größerer Ordnung erfahren. Nach der Entlastung streben die Molekülketten wieder einen ungeordneten Zustand an und ziehen sich in die ursprüngliche Position zurück. Dies wird Allgemeinen als Entropie-Elastizität (= Gummielastizität) bezeichnet und es wird häufig bei Elastomeren und anderen leicht vernetzbaren Kunststoffen gefunden.

EPS30 hingegen liegt bei Raumtemperatur vollständig als Festkörper vor. In diesem Fall findet auf Molekülebene keine Entropie-Elastizität statt. Vielmehr gleiten die Moleküle durch die Druckbelastung aneinander ab und nehmen einen neuen Platz ein. In der Folge stellen sich für die Partikelschäume unterschiedliche plastische Deformationen ein, welche im Folgenden näher betrachtet werden.

Den Verlauf der plastischen Deformation als Funktion der Prüfzyklen zeigt Tabelle 3. EPS30 zeigt nach dem ersten Zyklus bereits eine plastische Deformation von über 22 %. Jeder Belastungszyklus erhöht die plastische Deformation, bis schließlich ein Wert von knapp über 27 % erreicht wird. Die Zunahme beträgt somit rund 5 %. EPP30 hingegen zeigt zu Beginn eine plastische Deformation von nur 5 %, welche im weiteren Verlauf auf bis zu 10 % ansteigt. Bei beiden Partikelschäumen stellt sich somit eine Zunahme der plastischen Deformation um 5 % ein.

**Tabelle 3** Plastische Deformation von EPS30 und EPP30.

Prüfzyklus	Plastische Deformation [%]						
	#1	#2	#3	#4	#5	...	#10
EPS	22,1	23,7	24,7	25,4	25,8	...	27,3
EPP	5,1	6,5	7,4	8,0	8,3	...	9,9

Zu beachten ist jedoch, dass diese Werte aus dem laufenden Versuch heraus bestimmt werden. Bereits gezeigt wurde, dass die plastische Deformation von EPP30 nach einer Ruhezeit von 24 h unabhängig von der Prüfzeit lediglich 4 % beträgt. Die Wiederherstellung der Unordnung auf der Molekülebene braucht neben einer gewissen Zeit auch Energie in Form von Wärme. Da der Partikelschaum ein guter Isolator ist, kann der Wärmeausgleich nicht sofort stattfinden.

#### 6.3.5.1 Auswertung der quasi-statischen Hysteresismessungen

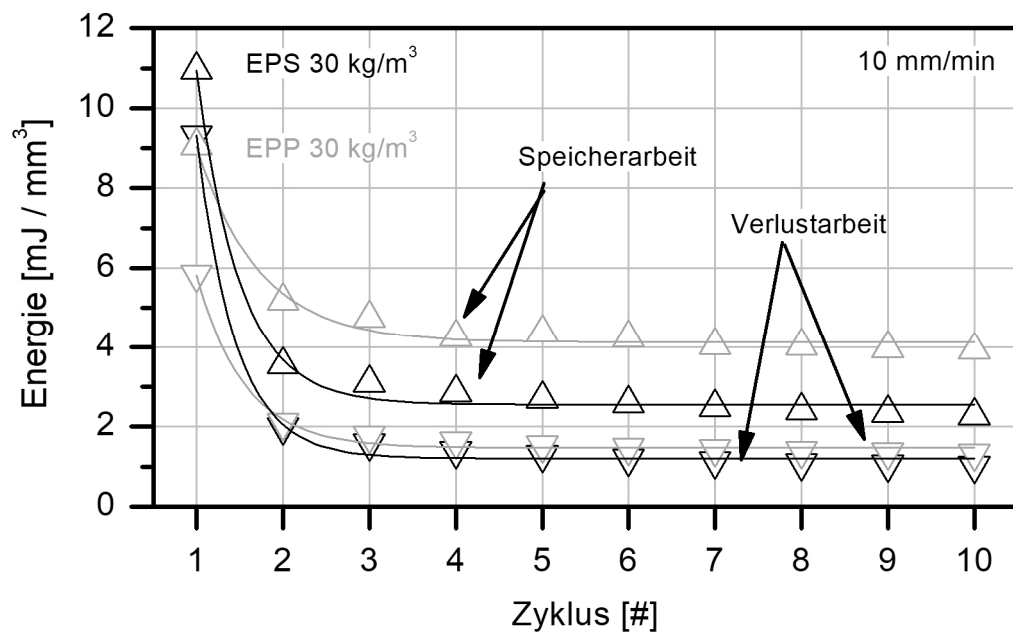
Erstmals sollen aus den quasi-statischen Deformationsversuchen weitere Kenngrößen (Speicherarbeit, Verlustarbeit und Dämpfung) aus der Hysteresisschleife abgeleitet werden, um das mechanische Verhalten der Partikelschäume genauer zu beschreiben. Im weiteren Verlauf soll eine phänomenologische Modellierung dieser Kenngrößen erfolgen.

Die Speicherarbeit (= Integral der Spannungs-Dehnungs-Kurve von 0 N bis zum Kraftmaximum) und die Verlustarbeit (= Integral der durch die Hysteresisschleife eingeschlossenen Fläche) beschreiben jeweils reversible und nicht reversible Vorgänge im Partikelschaum. Die Speicherarbeit (nach oben zeigende Dreiecke) und die Verlustarbeit (nach unten zeigende Dreiecke) für EPS30 (schwarz) und EPP30 (orange) sind als Funktion der Belastungszyklen in Abbildung 38 aufgeschlüsselt.

Die Speicherarbeit von EPS30 ist im ersten Zyklus besonders hoch und nimmt im Vergleich zu den weiteren Zyklen deutlich ab. Durch die erste Belastung ist das Schaumnetzwerk bereits stark geschädigt, was im vorherigen Abschnitt durch die hohe plastische Deformation gezeigt wurde. In den folgenden Belastungszyklen ist das Schaumnetzwerk nicht mehr in der Lage, denselben Anteil an mechanischer Arbeit wiederaufzunehmen. Auch nach einer Setzphase von drei Zyklen nimmt die Speicherarbeit stetig ab.

EPP30 hingegen unterscheidet sich auch in diesem Punkt von EPS30 deutlich. Auch hier ist ein Rückgang in der Speicherarbeit zu beobachten, welcher jedoch deutlich geringer ausfällt. Dies lässt sich mit der geringen plastischen Deformation, die EPP30 nach dem ersten Belastungszyklus zeigt, begründen. Nach den ersten drei Lastzyklen ergibt sich ein nahezu konstanter Verlauf der Speicherarbeit für EPP30. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass die mechanischen Eigenschaften ab diesem Belastungszyklus nahezu identisch bleiben.

Die Verlustarbeit hingegen ist für beide Polymere nahezu identisch. EPS30 zeigt lediglich im ersten Belastungszyklus einen höheren Betrag an Verlustarbeit. Für EPP30 ergibt sich nach der Setzphase von drei Zyklen ein nahezu konstanter Verlauf der Verlustarbeit. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass die Morphologie von EPP30 durch die Belastung weniger in Mitleidenschaft gezogen wird, als es bei EPS30 der Fall ist. Das erklärt auch, warum EPS sich grundsätzlich zur einmaligen Absorption einer relativ hohen Belastung eignet. EPP hingegen kann eine etwas geringere Belastung auch mehrfach absorbieren, da sich die mechanischen Eigenschaften weniger dramatisch verändern. Wichtiger jedoch ist, dass die plastische Deformation von EPP bei wiederholten Belastungen deutlich geringer ausfällt. Formteile aus EPP bleiben somit bei geringeren Belastungen deutlich formstabiler.



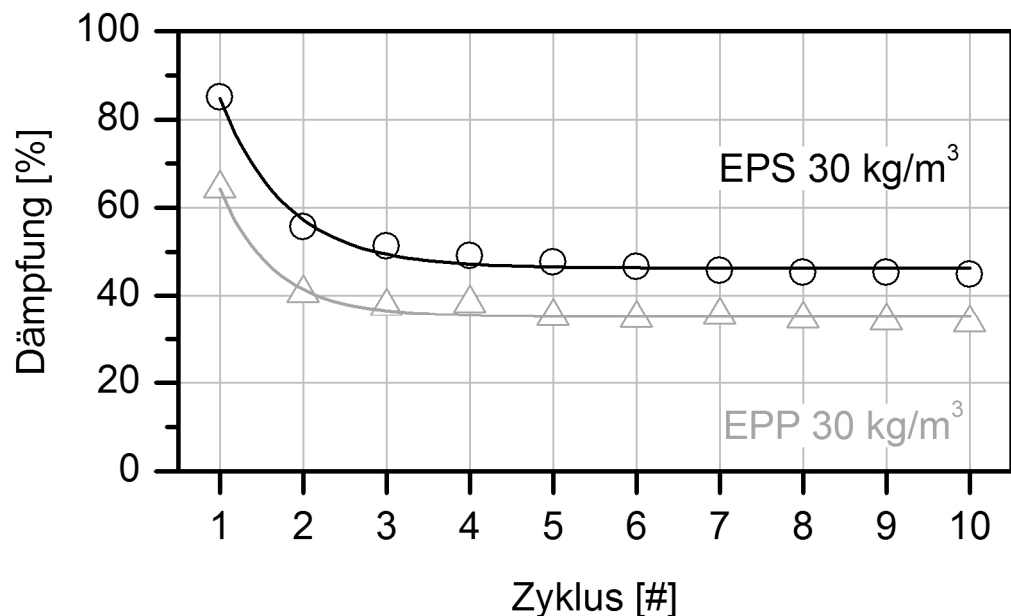
**Abbildung 38** Speicher- und Verlustarbeit als Funktion der Belastungszyklen.

Speicher- und Verlustarbeit beider Partikelschäume lassen sich mittels abfallender Exponentialfunktion nach Formel 10 als Funktion der Anzahl der Belastungszyklen  $Z$  phänomenologisch beschreiben:

$$F(Z) = Y_0 + A_1 * (e^{-\frac{Z}{T_1}}) \quad (10)$$

Hierbei ist  $Y_0$  der asymptotische Grenzwert, an den sich die Funktion annähert,  $A_1$  beschreibt die Amplitude der E-Funktion und  $T_1$  die Zeitkonstante.

Der korrespondierende Fit ist als durchgezogene Linie in Abbildung 38 gezeigt. Die Güte der Fits liegt für alle Größen bei  $R^2 > 0,98$ . Eine Korrelation ist somit plausibel. Da sich die Spannungs-Dehnungs-Kurven der Materialien jedoch mit Variation der Prüfgeschwindigkeit verändern, sind die genannten Modelle lediglich auf die genannten 10 - mm/min-Messungen zu beschränken. Eine Übersicht über die ermittelten Fitting-Parameter der verwendeten Materialien ist in Tabelle 4 (S. 75) gezeigt.



**Abbildung 39** Quasi-statisches Dämpfungsvermögen von EPS30 und EPP30 als Funktion der Prüfzyklen unter konstanten Belastungsbedingungen.

Die Dämpfung ist ein Verhältnismaß aus der Verlustarbeit und der Speicherarbeit. Sie ist eine weitere wichtige Kenngröße für die Beschreibung des Materialverhaltens. Abbildung 39 zeigt die Dämpfung für die zehn quasi-statischen Belastungszyklen für EPS30 (schwarz) und EPP30 (orange) getrennt auf. Durch die Schädigung des Schaumnetzwerks und die permanente Deformation der Schaumpartikel wird ein großer Teil der mechanischen Energie in der Probe in Wärme und die Bildung von Oberflächen umgewandelt. Dies erklärt die anfänglich hohe Dämpfung. Da bei weiteren Belastungen nur wenige weitere Zellen

plastisch deformiert werden, müssten die Dämpfungswerte auf die innere Reibung der Zellwände und die Verdichtung der eingeschlossenen Luft zurückgeführt werden.

Eine Modellierung der Dämpfung mittels exponentiell abfallender e-Funktion liefert einen adäquaten Fit ( $R^2 = 0,98$  für EPS30,  $R^2 = 0,97$  für EPP30) und wird durch die durchgezogenen Linien in Abbildung 39 wiedergegeben. Die anfänglich hohe Dämpfung fällt über den Verlauf der Zyklen ab und approximiert einen Wert von 46 % für EPS30 und 35 % für EPP30. Nach einer Konditionierung von fünf Zyklen hat das Material sich hinreichend gesetzt. Dabei nähert sich EPS30 deutlich schneller an seinen Grenzwert an als EPP30.

Eine mögliche Begründung für die Unterschiede in der Dämpfung ist die höhere Zähelastizität von EPP gegenüber EPS. Der Rückhalt der Molekülketten, der hochbewegliche Zustand der amorphen Phase und das höhere Rückstellvermögen von EPP müssen zunächst überwunden werden. Somit ist eine höhere Anzahl an Prüfzyklen nötig, bis sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat.

**Tabelle 4** Modellkoeffizienten.

<b>Modell</b>	<b><math>Y_0</math></b> <b>(Grenzwert)</b>	<b><math>A_1</math></b> <b>(Amplitude)</b>	<b><math>T_1</math></b> <b>(Zeitkonstante)</b>	<b><math>R^2</math></b> <b>(Bestimmtheit)</b>
<b>Dämpfung EPS30</b>	46,3 %	1,346	0,978	0,985
<b>Dämpfung EPP30</b>	35,2 %	1,341	0,652	0,977
<b>Speicher EPP30</b>	4,12 mJ/mm <sup>3</sup>	19,77	0,718	0,983
<b>Speicher EPS30</b>	2,55 mJ/mm <sup>3</sup>	62,43	0,498	0,991
<b>Verlust EPP30</b>	1,46 mJ/mm <sup>3</sup>	26,64	0,552	0,991
<b>Verlust EPS30</b>	1,20 mJ/mm <sup>3</sup>	77,65	0,443	0,995

### 6.3.6 Zusammenfassung

Für ein statistisch gesichertes Ergebnis bei der Ermittlung mechanischer Kenngrößen im quasi-statischen Versuch ist eine Anzahl von fünf Probekörpern ausreichend, wenn die Probenpräparation hinreichend gleichmäßig erfolgt. Weiterhin kann die Geometrie der Prüfkörper zwischen 12,5 mm und 50 mm Kantenlänge variiert werden, ohne dass dies die Kenngrößen negativ beeinflusst. Ferner ist das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von EPS30 und EPP30 zwischen 5 mm/min und 50 mm/min stark geschwindigkeitsabhängig und für die Polymere unterschiedlich.

Die plastische Deformation bei zyklischer Belastung ist mittels abfallender e-Funktion beschreibbar. Die Änderungen in den aus der Hysteresisschleife abgeleiteten mechanischen Kenngrößen Speicherarbeit, Verlustarbeit und Dämpfung können ebenfalls mittels einer e-Funktion modelliert werden. Das mechanische Verhalten der Partikelschäume bei zyklischer Belastung scheint nach fünf „Setzzyklen“ nahezu konstant zu sein. Grundsätzlich lässt sich ableiten, dass Formteile aus EPS30 eher für einen einmaligen Lasteintrag und Formteile aus EPP30 auch für periodische Lasteinträge geeignet sind.

Die Unterschiede im mechanischen Verhalten können durch die Unterschiede im Glaszustand der Partikelschäume erklärt werden. Während EPP30 sich bei Raumtemperatur eher zähelastisch verhält, ist EPS30 spröder und zeigt somit reines Festkörperverhalten.

## 6.4 Hysteresismessungen

In diesem Kapitel werden Hysteresismessungen an EPS30 und EPP30 diskutiert. Durchgeführt werden diese Messungen an einer servo-hydraulischen Prüfeinrichtung, welche im Folgenden Pulser genannt wird. Dieser eignet sich hervorragend zur Bestimmung der Lebensdauer zyklisch belasteter Bauteile unterschiedlichster Materialklassen. Durch die hohe Dynamik des beweglichen Kolbens und die Leistungsreserven des Hydraulikaggregates sind auch anspruchsvolle Regelvorgänge möglich. Der Pulser ist mit einer einzigartigen Prüfsoftware ausgestattet, die nach dem Prinzip der Mittenkurve ein erweitertes Spektrum an mechanischen Kenngrößen aus Hysteresisschleifen ableitet.

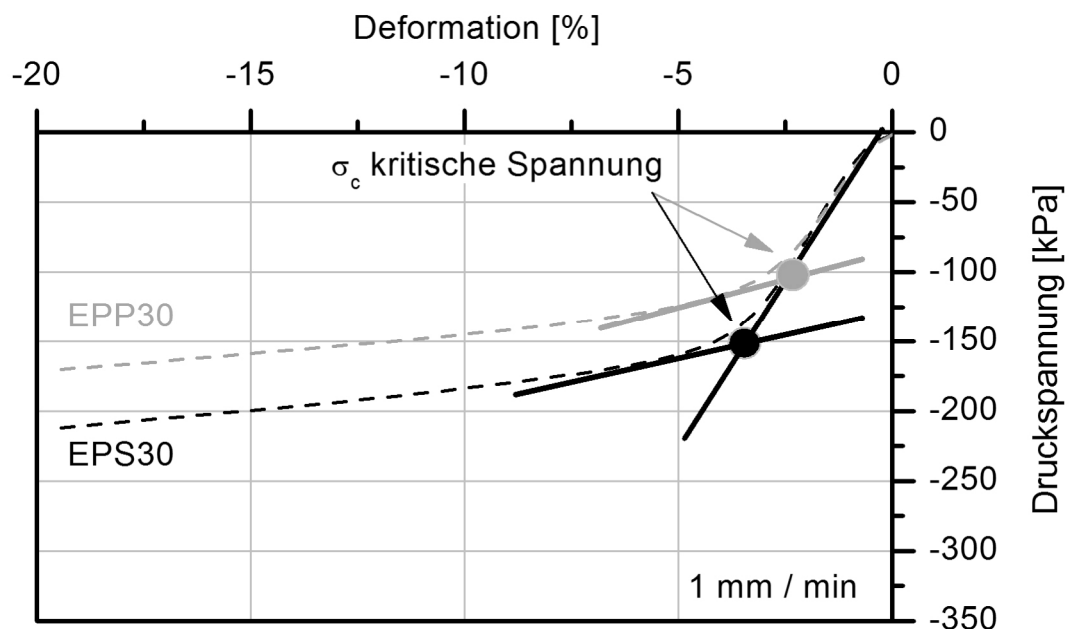
Zur Einsparung wertvoller Zeit an der servo-hydraulischen Prüfmaschine wird erstmals eine neuartige Halterung verwendet, welche die Prüfung von bis zu fünf Prüfkörpern gleichzeitig



ermöglicht. Die so gewonnenen Kenngrößen entsprechen dann bereits dem Mittelwert aus der Anzahl der Proben. Eine aufwändige Wiederholungsprüfung mit einzelnen Probenkörpern kann dadurch eingespart werden.

#### 6.4.1 Hysteresismessungen bei konstantem R-Verhältnis

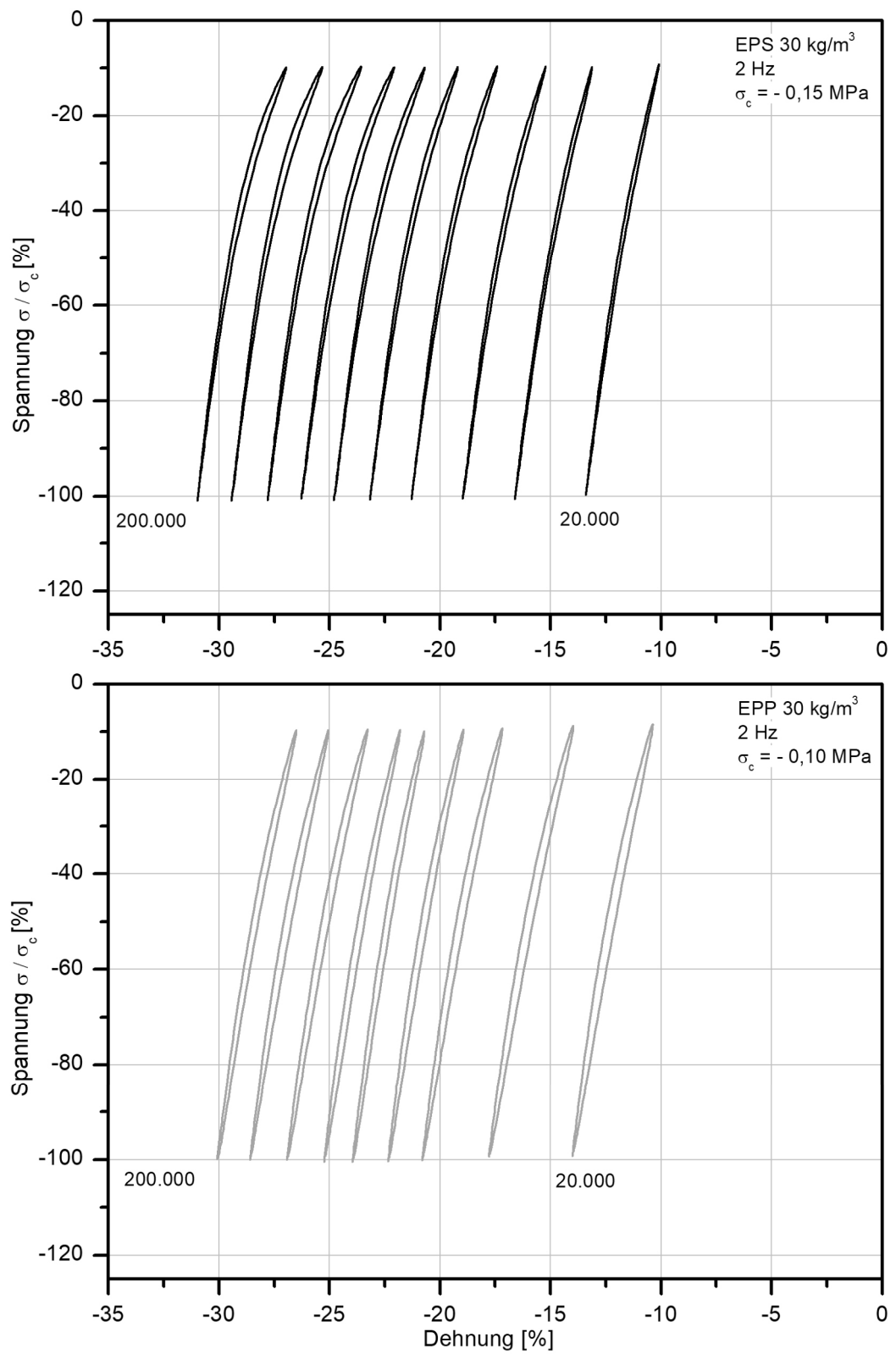
Da bisher noch keine verlässliche Aussage über mögliche kritische Spannungsniveaus in der Literatur existiert, wird eine eigene Vorgehensweise zur Bestimmung dieser vorgeschlagen. Grundlage hierfür sind die aus der quasi-statischen Prüfung ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven für EPS30 und EPP30 bei langsamsten Prüfungsgeschwindigkeiten von 1 mm/min. Graphisch wird nun der Schnittpunkt zweier Tangenten gesucht. Dies ist zum einen die Steigung des linearen Bereiches und zum anderen die Steigung des Plateaus bei geringen Deformationen. Der Schnittpunkt hieraus wird als Belastungsgröße für die Ermüdungsprüfung gewählt (sh. Abbildung 40). Für EPS30 ergibt sich somit eine kritische Spannung von - 150 kPa und für EPP30 ein Wert von - 100 kPa.



**Abbildung 40** Kritische Spannung von EPS und EPP.

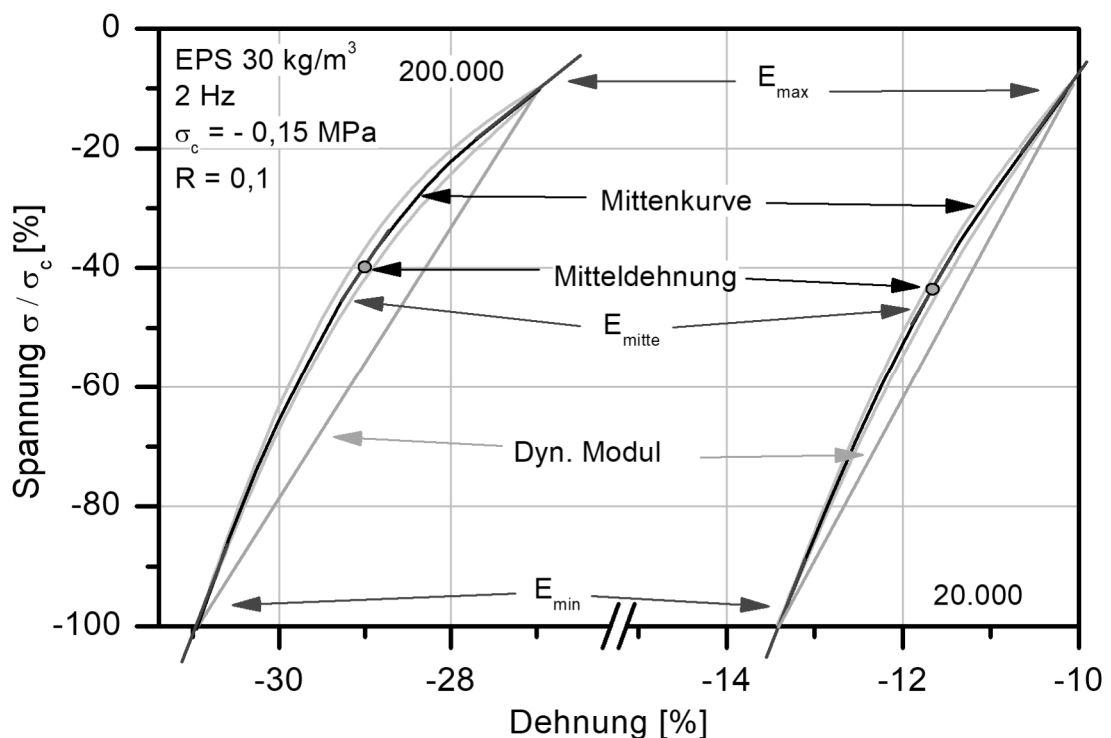
Die Prüfung bei konstantem R-Verhältnis von 0,1 wird mit den so identifizierten Spannungswerten durchgeführt. Die Entlastungsgröße wird gemäß dem R-Verhältnis von 0,1 auf 1/10 der kritischen Größe gesetzt. Da die Belastungsamplituden deutlich größer sind und somit auch mehr mechanische Energie in Wärme umgesetzt wird, wird die Prüffrequenz für diesen Fall auf 2 Hz abgesenkt. Somit ist weiterhin eine Prüfung möglich, ohne dass die Proben eine Temperaturerhöhung von mehr als 5 °C im Kern erfahren. Ziel ist unter anderem die Bestimmung des Übergangs vom linearen zum nichtlinearen Materialverhalten, was aus der Formänderung der Hysteresisschleifen abgeleitet wird.

Die Formänderung der Hysteresisschleifen des Ermüdungsversuchs mit konstantem R-Verhältnis zeigt Abbildung 41. Hierbei ist zu beachten, dass, ähnlich den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen aus den vorherigen Abschnitten, auch auf diesem Bild die Dehnung auf der horizontalen Achse negativ nach links zunehmend und die Spannung auf der vertikalen Achse negativ nach unten zunehmend aufgetragen wird. Der zeitliche Verlauf der Hysteresisschleifen ist demnach von rechts nach links zu sehen. Zusätzlich ist die Spannung auf die jeweils für das Polymer identifizierte kritische Spannung  $\sigma_c$  normiert. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich des Materialverhaltens miteinander.

**Abbildung 41** Hysteresisschleifen von EPS30 und EPP30 bei kritischer Spannung.

Die Hysteresisschleifen repräsentieren einen Abstand von 20.000 Schwingspielen (= 2,7 h). Der Versuch läuft über 200.000 Schwingspiele (= 27,7 h). Die Hysteresisschleifen von EPS30 sind in schwarz und die von EPP30 in orange in Abbildung 41 aufgetragen. Die Breite des aufgetragenen Bereichs ist bewusst so gewählt, dass nur die langsam ablaufenden Effekte im Material gezeigt werden. Die anfängliche starke Veränderung im Material vom Beginn der Messung wird an dieser Stelle ausgeblendet.

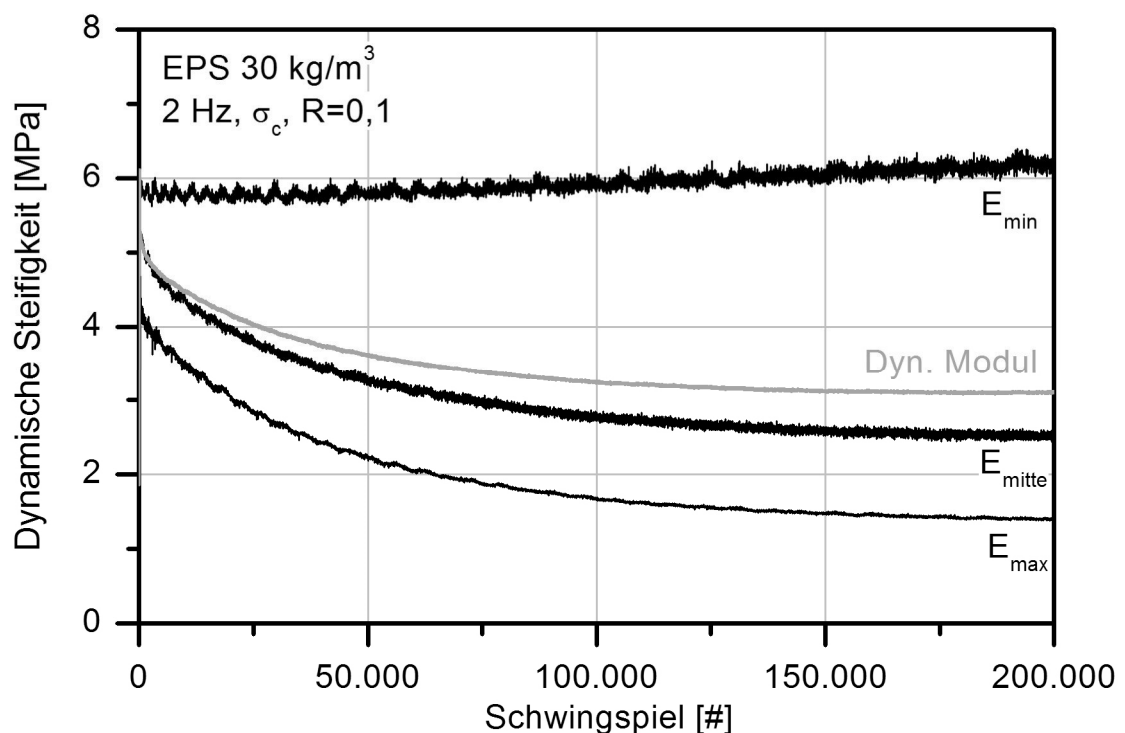
Die Formänderung der Hysteresisschleifen und die daraus ableitbaren Kenngrößen wie das dynamische Kriechen, das Dämpfungsverhalten sowie Veränderungen in der Steifigkeit werden im Einzelnen diskutiert. Am Beispiel von EPS30 wird nochmals gezeigt, wie die unterschiedlichen Steifigkeiten konkret aus den Hysteresisschleifen abgeleitet werden. Hierzu sind exemplarisch zwei Hysteresisschleifen aus dem vorherigen Versuch in Abbildung 42 vergrößert aufgetragen. Der zeitliche Verlauf der Steigung der Mittenkurve an den Umkehrpunkten und am Punkt der Mitteldehnung im Vergleich zum dynamischen Modul kann das nichtlineare Materialverhalten von Partikelschäumen näher beschreiben.



**Abbildung 42** Formänderung der Hysteresisschleifen von EPS30.

So ist es zum Beispiel möglich, aus dem Vergleich der Steifigkeit an den Umkehrpunkten eine Dehnverfestigung nachzuweisen. Wird hingegen das dynamische Modul mit den restlichen Steifigkeiten verglichen, so kann das spezifische Elastizitäts- und Dämpfungsverhalten der Partikelschäume in jeder Phase der Belastung beschrieben werden. Somit kann eine Validierung der Bauteilauslegung an spezifische Anforderungen erfolgen.

Die mittels Hysteresismessungen bestimmten dynamischen Steifigkeiten der Mittenkurve für EPS30 sind in Abbildung 43 getrennt als Funktion der Schwingspiele gezeigt. Hierbei handelt es sich sowohl um den dynamischen Modul (orange) als auch um die Steifigkeiten an den Umkehrpunkten ( $E_{\min}$ ,  $E_{\max}$ ) sowie am Mittelpunkt der Mittenkurve ( $E_{\text{mitte}}$ ). Durch den Druckcharakter des Versuches ist zu beachten, dass die Notationen für  $E_{\min}$  und  $E_{\max}$ , wie bereits erwähnt, vertauscht sind;  $E_{\max}$  beschreibt somit die Steifigkeit bei der geringsten Last und  $E_{\min}$  entsprechend bei der höchsten Last.



**Abbildung 43** Dynamische Steifigkeiten der Mittenkurve von EPS30.

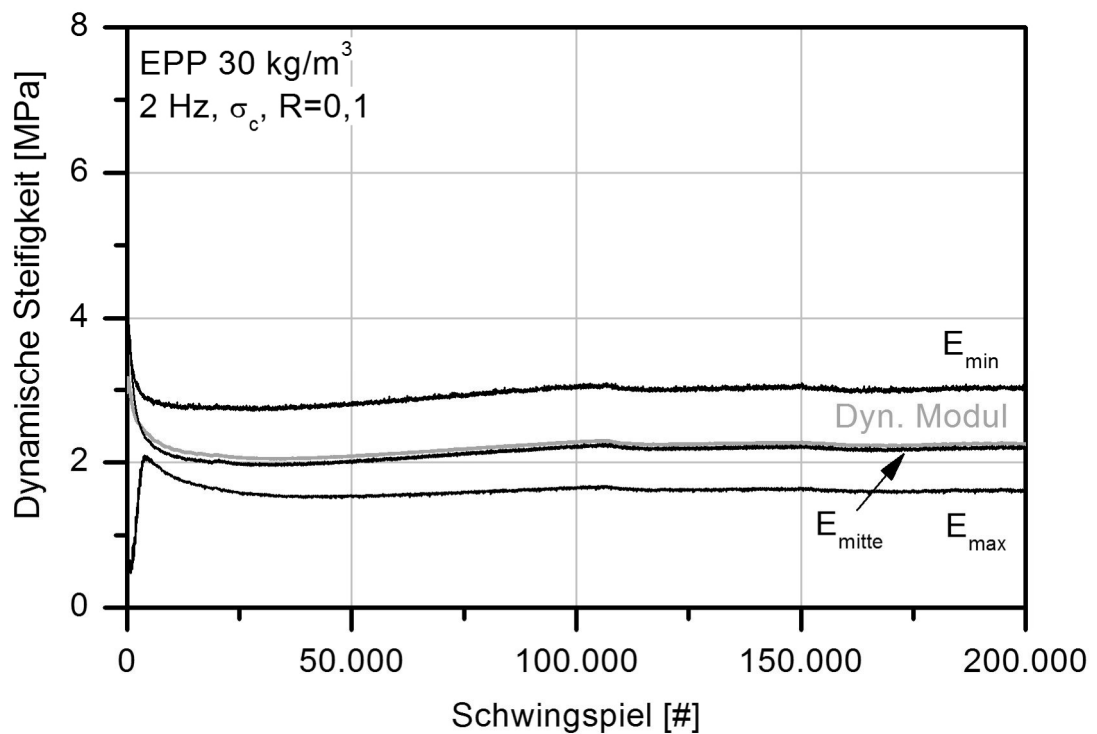
Die Steifigkeiten an den Umkehrpunkten bilden die beiden Extremwerte. Während die Steifigkeit  $E_{\max}$  am Entlastungspunkt mit der Versuchsdauer abnimmt, kommt es auf der anderen Seite zu einer leichten Erhöhung von  $E_{\min}$ . Somit verhält sich das EPS30 beim Anfahren der Hysteresisschleife mit der Zeit deutlich weicher. Die Zunahme der Steifigkeit  $E_{\min}$  zeigt die Auswirkung der Dehnverfestigung.

Beachtenswert ist auch die Abweichung der mittleren Steifigkeit zu dem dynamischen Modul. Zu Beginn des Versuches liegen diese beiden Kenngrößen nahezu aufeinander. Nach wenigen Schwingspielen jedoch trennen sich die Kurven voneinander. Die Abweichung kommt durch das nichtlineare viskoelastische Verhalten zustande. Dies zeigt, warum die Definition des dynamischen Moduls lediglich für den linearen Bereich anzuwenden ist. Weiterhin zeigt dies, dass nichtlineares Verhalten quasi ab Versuchsbeginn auftritt.

Die in Abbildung 41 gezeigten Hysteresisschleifen für EPP30 zeigen nur eine geringe Formänderung über den Messzeitraum. Dies spiegelt sich auch in den dynamischen Steifigkeiten wider. Analog zum EPS30 sind die dynamischen Steifigkeiten als Funktion der Schwingspiele in Abbildung 44 für EPP30 gezeigt.

Die Einregelphase und die temperaturbedingten Erweichungseffekte (bis 10.000 Schwingspiele) müssen bei EPP30 ausgeklammert werden. EPP30 reagiert deutlich empfindlicher auf Temperaturveränderungen mit Änderungen in der dynamischen Steifigkeit, daher muss die Einregelphase und der damit einhergehende Temperatúrausgleich besonders berücksichtigt werden. Nach dieser Einregelung beschreiben die dynamischen Steifigkeiten einen nahezu konstanten Verlauf. Die Steifigkeiten an den Umkehrpunkten der Hysteresisschleife ( $E_{\min}$ ,  $E_{\max}$ ) beschreiben auch bei EPP30 die extremen Grenzwerte. Zusätzlich sind das dynamische Modul und die Steifigkeit an der Mitte der Mittenkurve nahezu identisch. Somit ist die vorherige Beobachtung, dass sich die Form der Hysteresisschleife während der Versuche kaum ändert, bestätigt. Dies zeigt weiterhin, dass sich EPP30 im gewählten Belastungsfenster nahezu linear viskoelastisch verhält.

Neben den dynamischen Steifigkeiten kann auch das Dämpfungsverhalten der Partikelschäume gezielt mittels der Formänderung der Hysteresisschleife beschrieben werden. Die bei EPS30 anfänglich nahezu geschlossene Hysteresisschleife wird im Laufe der Messung immer breiter. Somit steigen die umschlossene Fläche und damit auch die Dämpfung (sh. Abbildung 42).



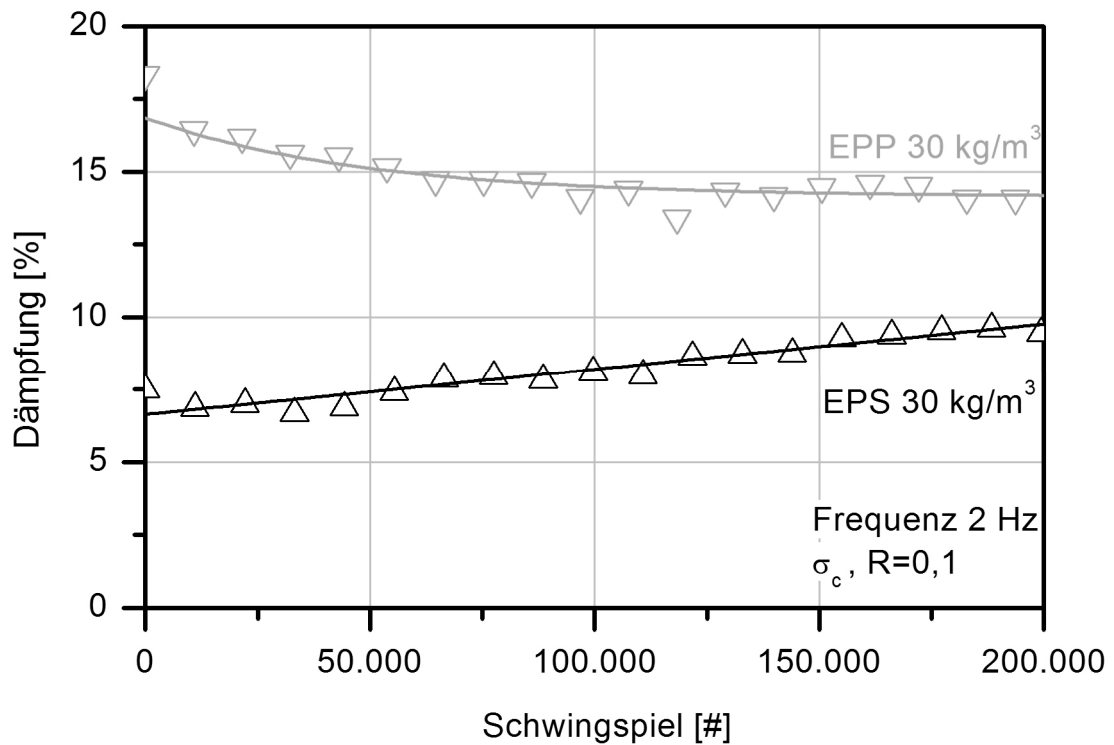
**Abbildung 44** Dynamische Steifigkeiten der Mittenkurve von EPP30.

Die gemessene Dämpfung der Partikelschäume als Funktion der Schwingspiele ist in Abbildung 45 getrennt aufgeschlüsselt aufgezeigt. Die Dämpfung von EPS30 (sh. Abbildung 45, schwarz) nimmt von anfänglich 6 % auf 10 % im Laufe des Versuchs linear zu. Sie lässt sich mittels einer linearen Regression gut beschreiben. Da die Steigung dieser Geraden äußerst klein ist und nur rund  $2 \cdot 10^{-5} \%$ /Schwingspiel beträgt, kann die Zunahme in der Dämpfung auf das Erweichen zellulärer Strukturen und das Versagen des Zellnetzwerks zurückgeführt werden.

Das Dämpfungsverhalten von EPP30 (sh. Abbildung 45, orange) hingegen nimmt mit zunehmender Prüfung stetig ab. Sie ist mittels einer exponentiell abfallenden Funktion beschreibbar. Die Dämpfung nimmt im Verlauf der Prüfung um 3 % ab. Nach etwa 50.000 Schwingspielen hat sich ein Gleichgewichtszustand ausgebildet und die Dämpfung nimmt im weiteren Verlauf nur unbedeutend ab.

Ob das bereits angesprochene eingeschlossene Zellgas ursächlich für dieses Verhalten ist oder die leichte Temperaturerhöhung, kann abschließend nicht geklärt werden. Hierzu

müsste der Einfluss des eingeschlossenen Zellgases auf die dynamische Dämpfung weiter untersucht werden. Dass eingeschlossenes Zellgas bei der Verdichtung von EPP bereits sehr früh austritt, wurde in den Arbeiten von Boiux bereits gezeigt [29]. Für EPS fehlen jedoch noch systematische Untersuchungen zu diesem Sachverhalt.



**Abbildung 45** Dämpfung [%] als Funktion der Schwingspiele.

#### 6.4.1.1 Zusammenfassung

Die Prüfung mit konstantem R-Verhältnis bei der kritischen Spannung zeigt bereits nicht-lineares Verhalten für EPS30 bei laufender Prüfung. EPP30 hingegen scheint sich noch linear zu verhalten. Zusätzlich ist die gezeigte dynamische Ermüdung für beide Polymere bereits nach 200.000 Schwingspielen sehr hoch. Aus den Hysteresisschleifen lässt sich sowohl für EPS30 als auch für EPP30 eine relativ hohe Deformationsrate ableiten. Vermutlich ist der Kriechmodus II für die hohe plastische Deformation verantwortlich. Die Bestimmung der Grenze des Übergangs von Kriechmodus I zu II ist aus diesem Versuch nicht möglich. Diese wird durch systematische Variation der Mittelspannung und Spannungsamplitude in den nächsten Abschnitten für beide Partikelschäume getrennt bestimmt.



Aus den statischen Kriechversuchen von z. B. Krollmann [26] wurde deutlich, dass EPS bei einer ähnlichen Raumdichte und unter ähnlichen Belastungshöhen nur um wenige Prozent deformiert wird. Die vorliegenden zyklischen Ermüdungsversuche zeigen jedoch für EPS30 und EPP30 bereits eine sehr hohe plastische Deformation nach nur wenigen Schwingspielen. Es ist daher von großer Bedeutung, in welcher Art ein Partikelschaum belastet wird. Eine rein statische Last wird sehr gut über einen langen Zeitraum verkraftet. Überlagern sich die statischen Belastungen mit schwingenden Größen, so wird das Schaumnetzwerk nahezu sofort nachhaltig geschädigt. Dies ist für die konstruktive Auslegung von besonderer Wichtigkeit, da aus den statisch bestimmten Kenngrößen keine Lebensdauer für schwingende Lastfälle abgeleitet werden kann.

#### **6.4.2 Dynamische Ermüdung von EPS30**

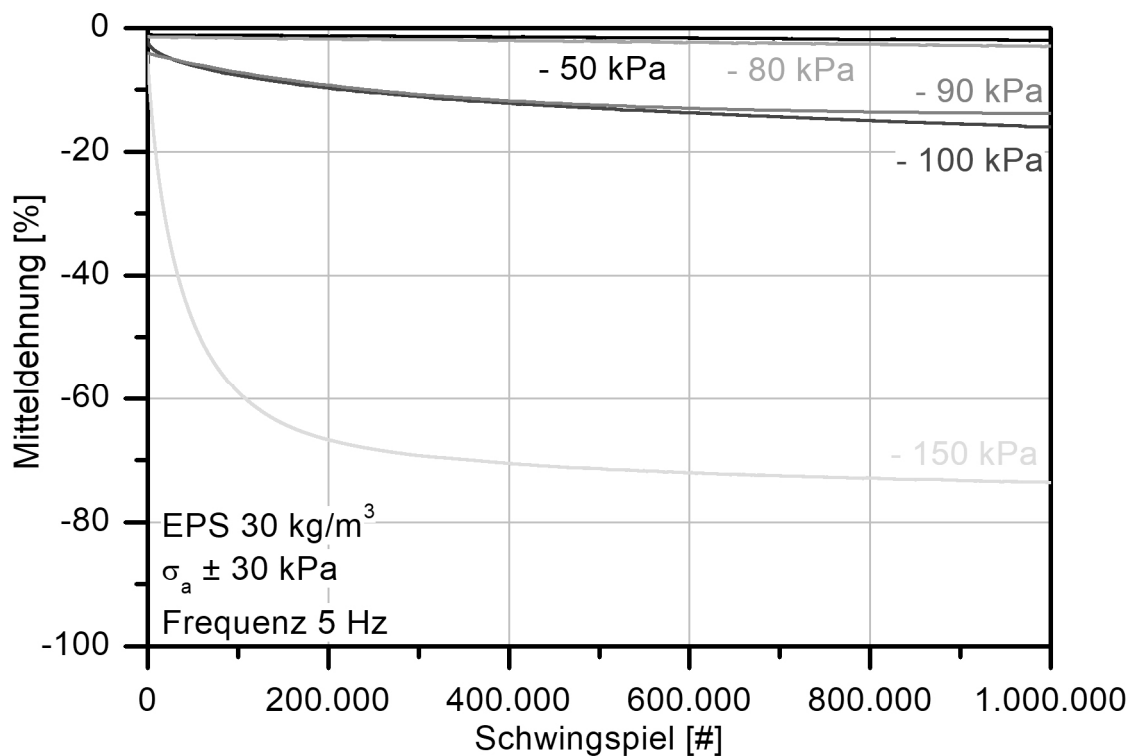
Ziel dieses Abschnittes ist die Bestimmung der Mitteldehnung von EPS30 als Funktion der Mittelspannung und der Spannungsamplitude mittels Hysteresismessungen.

##### **6.4.2.1 Mittelspannungseinfluss**

Zunächst wird der Einfluss der Mittelspannung auf die Mitteldehnung bei konstanter Spannungsamplitude von EPS30 erörtert. Abbildung 46 zeigt die Mitteldehnung [%] von EPS30 über der Schwingspielanzahl in Abhängigkeit von der Mittelspannung bei konstanter Spannungsamplitude  $\pm 30 \text{ kPa}$  ( $= 20 \% \cdot \sigma_c$ ). Eine kleinere Spannungsamplitude bei der geringsten Mittelspannung hätte eine zu geringe Dehnungsamplitude zur Folge, welche sich nicht mehr präzise regeln ließe. Die Mittelspannung von  $-50 \text{ kPa}$  ( $= 33 \% \cdot \sigma_c$ ) stellt außerdem die untere für das Material sinnvoll darstellbare Grenze der Belastung dar, weil immer eine Mindestspannung von  $-20 \text{ kPa}$  auf den Proben lasten sollte. Dies gewährleistet einen vollständigen Kontakt der Probenoberfläche mit dem Prüfstempel.

Die Mitteldehnung von EPS30 zeigt bei einer Mittelspannung von  $-50 \text{ kPa}$  (schwarz) lediglich eine lineare Abhängigkeit von der Anzahl der Schwingspiele. Der zugrundeliegende Kriechmodus kann auf Modus I bestimmt werden, da die Kriechrate sehr schnell auf 0 fällt.

Die Erhöhung der Mittelspannung auf - 80 kPa ( $= 53,3 \% \cdot \sigma_c$ , orange) hat lediglich zur Folge, dass sich die Mitteldehnung geringfügig erhöht. Das Materialverhalten ist jedoch rein linear und vom Kriechen in Modus I dominiert. Sowohl das Be- als auch das Entlastungsniveau liegen unterhalb von - 110 kPa, was etwa das Ende des hookeschen Bereiches im quasi-statischen Versuch darstellt. Aus den quasi-statischen Versuchen ist bereits bekannt, dass eine langsame Belastung bis 5 % Deformation bei EPS30 zu keiner Schädigung am Schaumnetzwerk führt. Die zyklischen Ermüdungsversuche bis zu einer Mittelspannung von - 80 kPa bilden exakt diesen Bereich ab. Die Mitteldehnung von EPS30 hängt bis - 80 kPa lediglich von dem maximalen Belastungsniveau ab und ist zumeist rein hookesch. Dies bestätigen auch die Beobachtungen von z. B. Krollmann (26).



**Abbildung 46** Mitteldehnung [%] von EPS als Funktion der Mittelspannung.

Wird die Mittelspannung jedoch weiter auf - 90 kPa ( $= 60 \% \cdot \sigma_c$ , rot) angehoben, so ändert sich das Materialverhalten von EPS30 fundamental. Zusätzlich zu dem linearen Kriechen ist eine exponentiell abfallende Komponente in der Mitteldehnung zu beobachten. Die Grenze vom linearen zum nichtlinearen Verhalten ist somit überschritten und der Kriechmodus II

bestimmt das Materialverhalten. Der Einfluss der exponentiellen Komponenten ist in den ersten Schwingspielen am größten und nimmt im Verlauf der Prüfung weiter ab.

Eine weitere Erhöhung der Mittelspannung auf - 100 kPa ( $= 66,6 \% \cdot \sigma_c$ , blau) hat jedoch keine signifikanten Auswirkungen auf die Mitteldehnung. Vermutlich ist die Änderung in der Mitteldehnung so gering, da das Entlastungsniveau noch innerhalb des linearen Bereichs ( $= - 70$  kPa) liegt.

Wird die Mittelspannung so weit erhöht, dass auch das Entlastungsniveau oberhalb der linearen Grenze liegt, wie es bei der Mittelspannung von - 150 kPa ( $= 100 \% \cdot \sigma_c$ , grün) der Fall ist, so ist die anfängliche Deformation so hoch, dass innerhalb von wenigen Schwingspielen die Probe um mehr als 50 % verdichtet wird. Nach etwa 100.000 Zyklen jedoch scheinen die exponentiellen Anteile so weit abgeklungen zu sein, dass der Deformationsmodus trotzdem noch dem Modus II entspricht. Trotz der hohen Belastungen kann der Kriechmodus III nicht identifiziert werden.

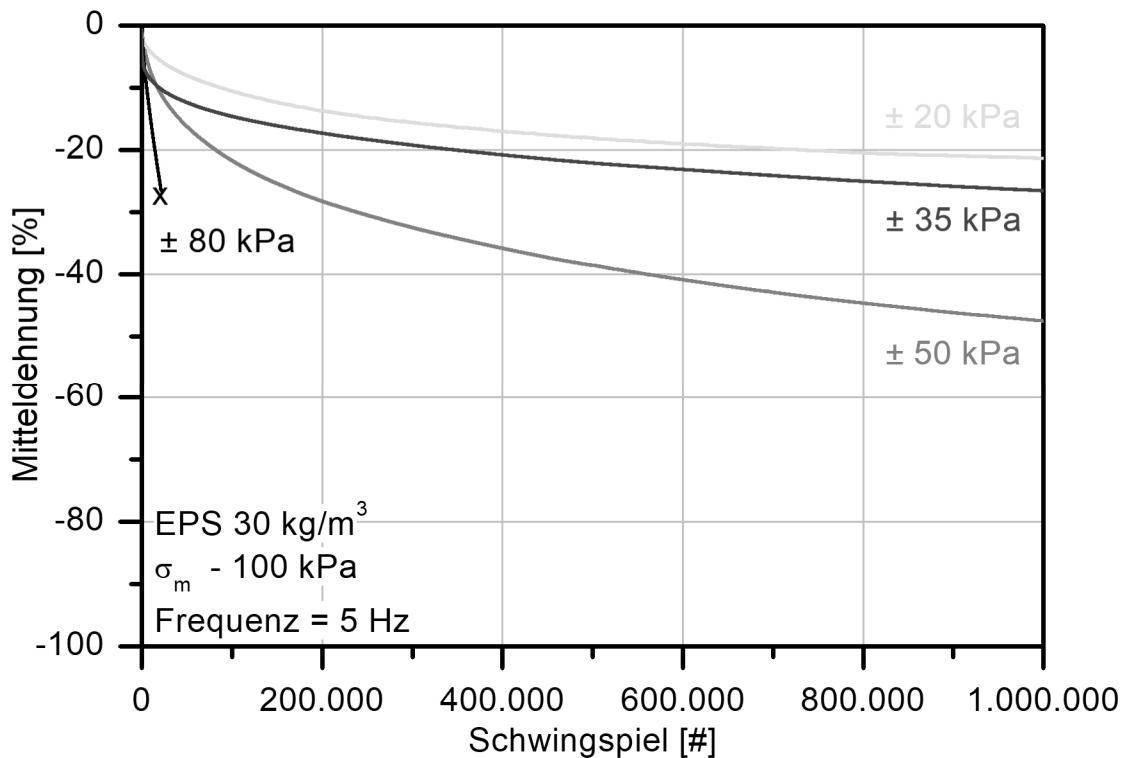
Zusammenfassend kann festgehalten werden: Es existiert für EPS30 eine klar definierbare Belastungsgrenze von etwa - 110 kPa ( $= - 80 \pm 30$  kPa), unterhalb welcher nur einfaches (ähnlich dem quasi-statischen) Kriechen im Modus I stattfindet. Die identifizierte Kriechrate ist abhängig von der Mittelspannung, sie steht aber in keinem Zusammenhang mit der für EPS30 typischen quasi-statischen Kriechrate (vgl. Krollmann (26)). Wird die Belastung weiter erhöht und überschreitet die Unterspannung die Grenze von - 120 kPa ( $= 90 \pm 30$  kPa), so zeigt EPS30 nichtlineare Effekte, deren Höhe unter anderem abhängig von der Höhe der Mittelspannung ist.

Ein Berechnungsansatz zur Beschreibung der Grenze des Übergangs von Kriechmodus I nach II direkt aus den quasi-statischen Versuchen heraus folgt in Abschnitt 6.4.4.

#### 6.4.2.2 Spannungsamplitudeneinfluss

Im vorherigen Abschnitt wurde die Mitteldehnung als Funktion der Mittelspannung bestimmt. In diesem Abschnitt soll nun der Einfluss der Spannungsamplitude auf die dynamische Ermüdung beleuchtet werden.

In Abbildung 47 ist der Einfluss der Spannungsamplituden ( $\pm 20$ ,  $\pm 35$ ,  $\pm 50$  und  $\pm 80$  kPa) auf die Mitteldehnung von EPS30 bei einer Prüffrequenz von 5 Hz abgebildet. Da die Grenze zum Kriechmodus II im vorherigen Abschnitt identifiziert wurde, wird der Einfluss der Spannungsamplitude nur im nichtlinearen Bereich, also oberhalb von  $-120$  kPa ( $= 90 \pm 30$  kPa) geprüft.



**Abbildung 47** Mitteldehnung [%] von EPS als Funktion der Spannungsamplitude.

Eine Spannungsamplitude von  $\pm 20$  kPa (grün) ruft im Material nur eine geringe plastische Deformationsrate (Kriechen pro Zeit) hervor. Nach Versuchsende sind etwas über 20 % Mitteldehnung zu verzeichnen. Das dynamische Kriechen ist dennoch um ein Vielfaches höher als das quasi-statische Kriechen bei ähnlicher Belastung. Somit hat die dynamische Belastung eine höhere Schädigung am Schaumnetzwerk ausgelöst, als es bei den gezeigten Kriechversuchen von Krollmann (26) der Fall ist. Eine Erhöhung der Spannungsamplitude auf  $\pm 35$  kPa (blau) führt direkt auch zu einer Erhöhung der Mitteldehnung. Der Verlauf der Kurve lehnt sich an die bereits gezeigten an. Wird die Spannungsamplitude auf  $\pm 50$  kPa (rot) erhöht, so befindet sich die Belastungsstufe weit oberhalb des aus dem quasi-statischen Versuch bestimmten Knies, und andere Deformationseffekte werden sichtbar. Hierdurch ist

die Kriechrate auch am Versuchsende deutlich höher. Bei Spannungsamplituden von  $\pm 80$  kPa hingegen ergibt sich eine zu starke Erwärmung der Probe. Dieser Versuch wurde wegen der dadurch fundamental unterschiedlichen Randbedingungen im Rahmen dieser Studie nicht weiter fortgesetzt.

### 6.4.3 Dynamische Ermüdung von EPP30

Analog zum EPS30 soll auch für EPP30 der Einfluss der Mittelspannung und der Spannungsamplitude auf das Ermüdungsverhalten aufgeklärt werden. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse kann eine geeignete Modellierung der Mitteldehnung im Anschluss erfolgen.

#### 6.4.3.1 Mittelspannungseinfluss

Gezielt den Einfluss der Mittelspannung auf das dynamische Kriechen von EPP30 (= Mitteldehnung) aufzudecken, ist Ziel dieses Abschnitts. Hierzu wurde das EPP30 mit einer konstanten Frequenz von 5 Hz, konstanter Spannungsamplitude von  $\pm 20$  kPa und variabler Mittelspannung getestet. Die kritische Spannungsamplitude beträgt - 100 kPa und ist somit um  $2/3$  geringer als bei EPS30 (vgl. Abschnitt 6.4.1). Die Lastniveaus sind bewusst so gewählt, dass in jedem der charakteristischen Bereiche (linear, Plateau und Verdichtung) getestet wird, analog zu EPS30. Abbildung 48 zeigt den typischen Verlauf der Mitteldehnung in Abhängigkeit von den Schwingspielen.

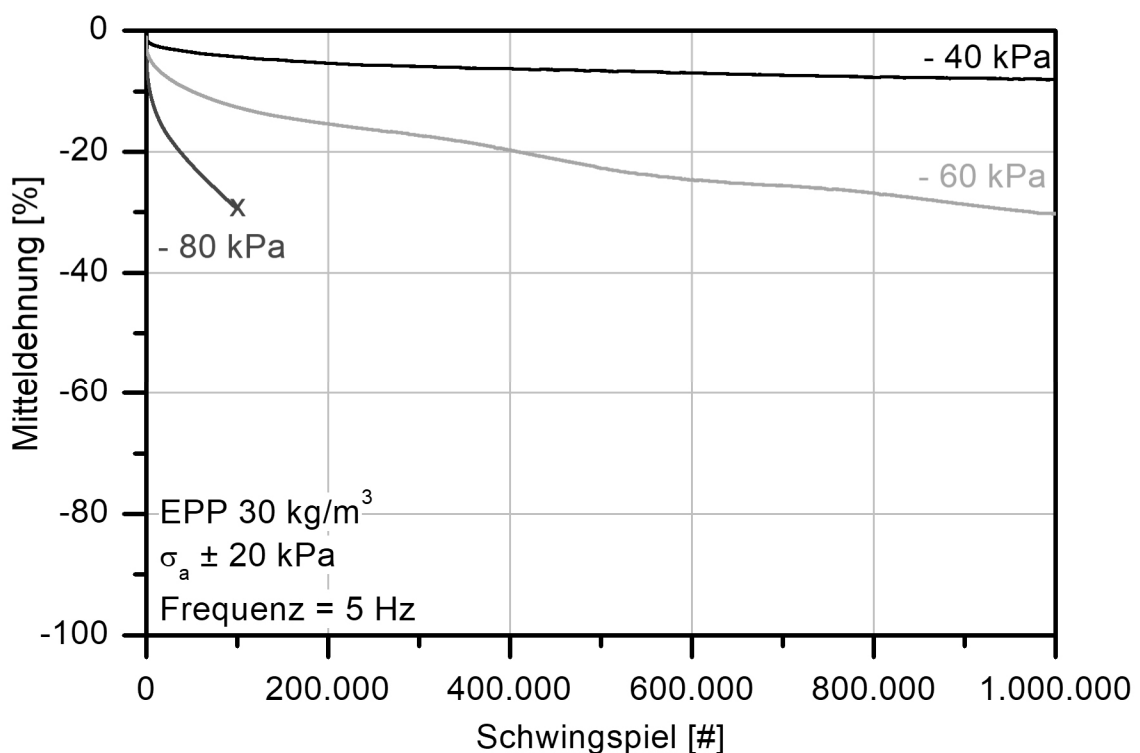
Eine Mittelspannung von - 40 kPa ( $= 40 \% \cdot \sigma_c$ , schwarz) bewirkt, dass das EPP30 sich nur wenig verdichtet. Wie bereits beim EPS30 gezeigt, scheint dies eine Grenze der unteren Belastung zu sein, bei der es nur zu einer rein elastischen Deformation mit Kriechen in Modus I kommt. Dennoch ist bereits bei dieser kleinen Mittelspannung eine leicht exponentiell abfallende Komponente zu erkennen. Vermutlich liegt dies an dem Glasübergangspunkt von EPP30. Die Molekülketten sind bei Raumtemperatur leichter gegeneinander verschiebbar.

Eine Erhöhung der Mittelspannung auf - 60 kPa ( $= 60 \% \cdot \sigma_c$ , orange) schlägt sich auch in der Erhöhung der Kriechrate nieder. EPP30 zeigt hier bereits Kriechen in Modus II, da die Kriechrate einen endlichen Wert ungleich null annimmt. Es ist ferner festzuhalten, dass

EPP30 stark auf Änderungen in der Umgebungstemperatur reagiert. Die Versteifung und Erweichung drückt sich in der Welligkeit der Mitteldehnung aus. Die Periodizität der Täler und Berge folgt einem festen Muster von rund 430.000 Schwingspielen.

Bei Mittelspannungen von - 80 kPa (= 80 % \*  $\sigma_c$ , blau) zeigt EPP30 auch das bereits gezeigte Verhalten im Kriechmodus II. Es ist hierbei jedoch zu beachten, dass der Versuch bei rund 100.000 Schwingspielen abgebrochen werden musste, da die Temperaturerhöhung im Material stetig anstieg und bereits mehr als 5 °C betrug.

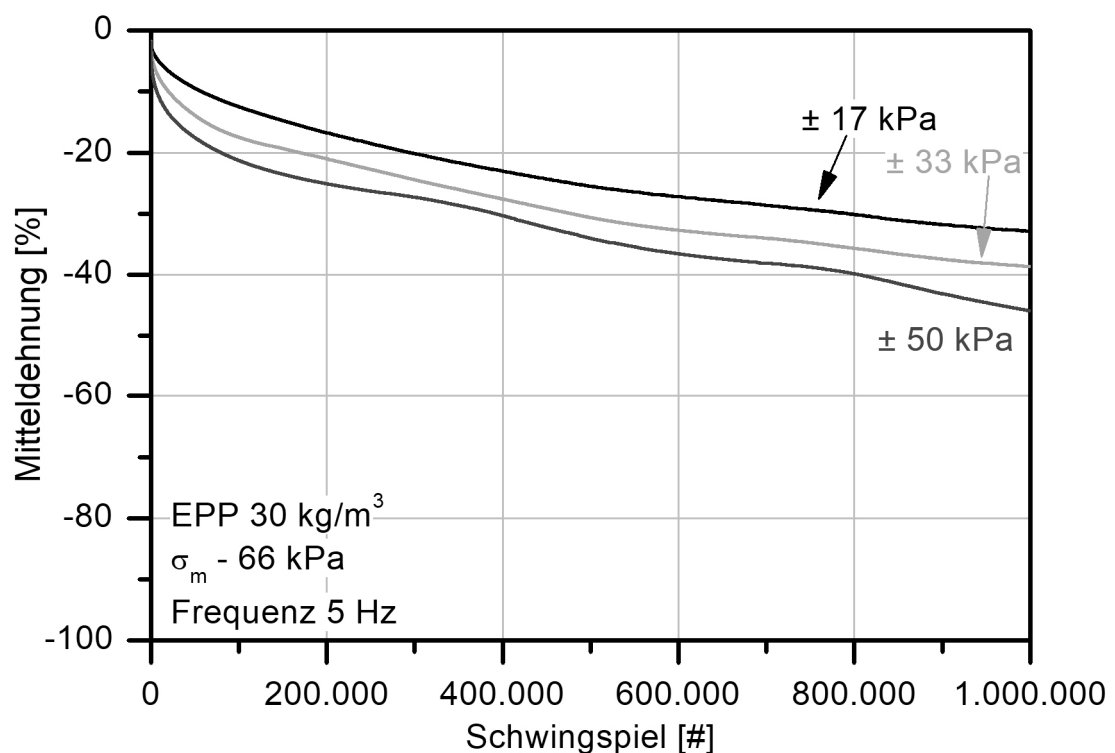
Es ist festzuhalten, dass EPP30 deutlich sensibler auf Änderungen in der Mittelspannung reagiert, was eher für den zähelastischen Charakter spricht. Eine Variation der Mittelspannung wird somit weniger gut verkraftet. Weiterhin ist für konstruktive Auslegungen der Bereich von bis zu - 40 kPa interessant, da es hier nur zu einer geringen plastischen Deformation kommt, die gut abschätzbar ist und mit den statischen Werten übereinstimmt.



**Abbildung 48** Mitteldehnung von EPP als Funktion der Mittelspannung bei konstanter Spannungsamplitude.

### 6.4.3.2 Spannungsamplitudeneinfluss

Die Bestimmung der Mitteldehnung als Funktion der Spannungsamplitude bei konstanter Mittelspannung ist Ziel dieses Abschnittes. Die kritische Mittelspannung für EPP30 beträgt - 100 kPa und ist um 2/3 kleiner als bei EPS30. Demnach muss die Spannungsamplitude auch an diese kritische Spannung angepasst werden. Sie beträgt somit 25 %, 50 % und 75 % der kritischen Spannung  $\sigma_c$ . Der Verlauf der Mitteldehnungen als Funktion der Spannungsamplitude bei konstanter Mittelspannung ( $\sigma_m = -66$  kPa) ist in Abbildung 49 dargestellt.



**Abbildung 49** Mitteldehnung von EPP30 als Funktion der Spannungsamplitude.

Zunächst auffällig sind die wellenförmigen Verläufe der Mitteldehnung und die Wiederholung von lokalen Tälern und Bergen im Takt von ca. 430.000 Schwingspielen, was in etwa 24 h entspricht. Dieser Effekt ist auf Temperaturschwankungen im Labor zwischen Tag und Nacht zurückzuführen. Obwohl die Norm eine entsprechende Temperaturschwankung von  $\pm 2$  °C erlaubt, beeinflusst dies die Messungen deutlich. Dies liegt am Glasübergang von EPP30, der unterhalb der Raumtemperatur liegt. Der amorphe Bereich des EPP30 ist somit bereits in einem hochbeweglichen Zustand.

Der Verlauf der Mitteldehnung ähnelt grundsätzlich dem von EPS30. Eine anfängliche starke Änderung in der Mitteldehnung flacht über den Messzeitraum hinweg ab. Jedoch ist der Einfluss der Spannungsamplitude auf die Mitteldehnung deutlich geringer im Vergleich zu EPS30. Das EPP30 zeigt auch bei kleinsten Spannungsamplituden eine vergleichsweise hohe plastische Mitteldehnung. Vermutlich ist die bereits angesprochene Gasdurchlässigkeit bei EPP30 höher, wodurch das eingeschlossene Zellgas die innere Festigkeit der Partikel nicht lange genug aufrechterhalten kann. Außerdem zeigt das EPP eine höhere Gummi-elastizität, wodurch der Einfluss der Mittelspannung größer ist.

Die gemessenen Verläufe der Mitteldehnungen decken bei EPP30 einen geringeren Bereich ab, als es bei EPS30 der Fall ist. Der Abstand in der Mitteldehnung zwischen der kleinsten und der größten Belastungsamplitude beträgt nach 1 Million Schwingspielen etwas über 15 %. EPS30 jedoch zeigt im gleichen Belastungsfenster einen Wert von fast 30 % und liegt somit doppelt so hoch. Folglich ist EPP30 weniger sensibel bei Änderungen der Spannungsamplitude. Dies liegt vermutlich an der höheren Elastizität des EPP30.

#### 6.4.4 Übergang von Kriechmodus I nach II

Hysteresismessungen, durchgeführt bei der aus den quasi-statischen Versuchen definierten kritischen Spannung, offenbarten bereits äußerst hohe plastische Deformationen sowohl für das EPS30 als auch für das EPP30, obwohl diese kritische Spannung sich noch im linearen Bereich befand (sh. Abschnitt 6.4.1, Seite 77 ff). Die Variation der Mittelspannung und der Spannungsamplitude zeigt weiterhin eindrucksvoll, dass es ein mögliches Belastungsfenster gibt, in dem die Mitteldehnung auch nach vielen Schwingspielen nahezu konstant bleibt. Dieser Vorgang kann als Kriechen im Kriechmodus I bezeichnet werden. Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht ist die Bestimmung dieser Grenze wichtig, damit ein sicheres Konstruieren mit diesen Materialien auch im dynamisch belasteten Umfeld möglich wird.

Der Übergang des Kriechens von Modus I nach Modus II wird in Abbildung 50 für EPS30 (schwarz) und EPP30 (orange) exemplarisch gezeigt. Die durchgezogenen Linien zeigen jeweils die Mitteldehnung, bei der es nach Versuchsablauf zu keiner großen Änderung in der Kriechrate kommt bzw. bei der die Kriechrate auf nahezu null absinkt. Die gestrichelten Linien zeigen hingegen exemplarische Messungen mit einem erhöhten Belastungsprofil, ab



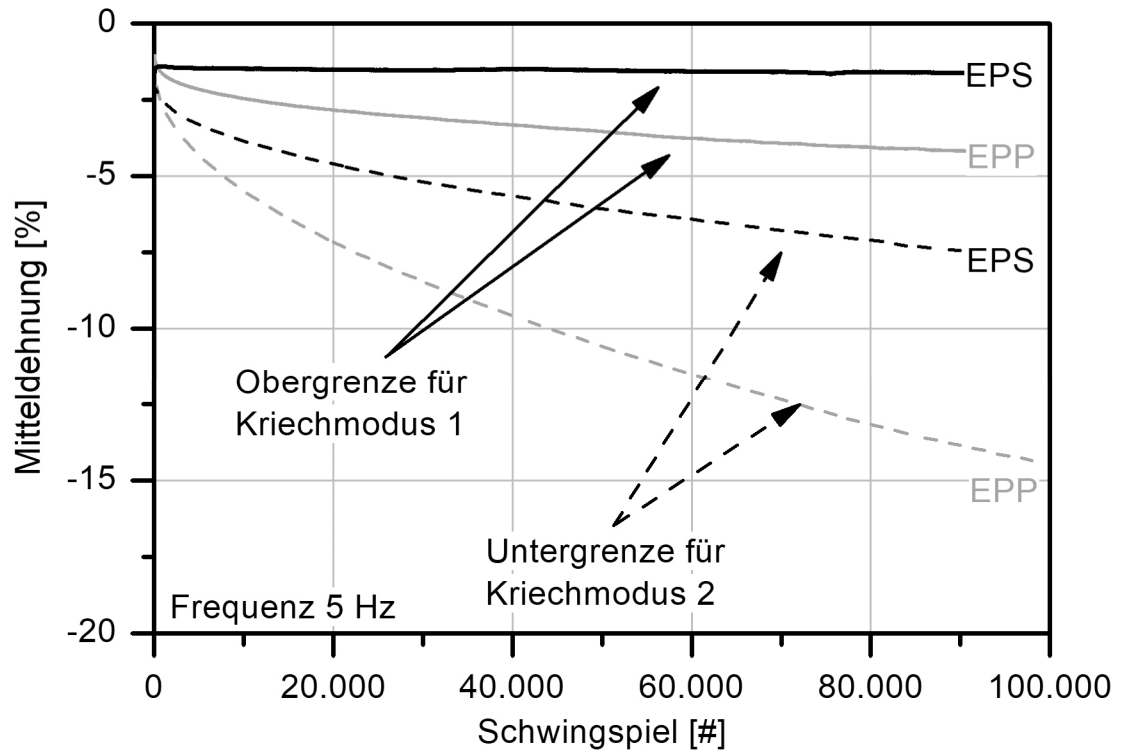
der die Kriechrate deutlich erhöht ist und auch bis zum Versuchsende einen endlichen Wert behält.

Für die analytische Bestimmung, welcher Kriechmodus vorliegt, kann eine geeignete Regression als Hilfsmittel herangezogen werden. Für den sogenannten „unterkritischen Fall“ lassen sich die Mitteldehnungen von EPS30 nur mittels einer linearen Funktion annähern. Andere Funktionen liefern entweder nur einen Fit mit unplausiblen Koeffizienten oder die Regression konvergiert überhaupt nicht. Nur wenn sich die gezeigte Mitteldehnung mit einer linearen Regression bestimmen lässt und keine exponentiellen Anteile enthält, ist für EPS30 der unterkritische Kriechfall im Modus I präsent. EPS30 zeigt zudem eine klare Grenze des Übergangs und zusätzlich eine Veränderung in der Form der Mitteldehnung. In diesem Fall kann dieser Lastbereich als konstruktiv sicher eingestuft werden.

Für EPP30 verhält es sich jedoch etwas anders. Der Übergang vom Kriechmodus I nach II ist nicht so leicht zu bestimmen, da auch bei kleinsten Belastungen eine deutlich größere Kriechrate existent ist. Der zu Beginn auftretende exponentielle Abfall der Mitteldehnung im unterkritischen Fall kann ebenfalls nicht adäquat mittels e-Funktion beschrieben werden. Es lässt sich jedoch auch keine lineare Regression ohne Fehler anwenden. Dennoch liegt in diesem Fall Kriechen im Modus I vor. Dies wird aus der sich einstellenden horizontalen Mitteldehnung erkenntlich. Zusätzliches Indiz ist die Kriechrate, bestimmt über die Ableitung der Mitteldehnung nach der Zeit am Ende des Versuchs, welche nahezu zu null wird. Dennoch wird der hier gezeigte Wert als valide für den Übergang von Kriechmodus I nach II angenommen. Dadurch kann auch hier ein Bereich angegeben werden, der konstruktiv auch für schwingende Betriebszustände genutzt werden kann.

Zusammenfassend kann mittels unterschiedlicher graphischer Hilfsmittel die Grenze des Übergangs von Kriechmodus I nach II von EPS30 und EPP30 bestimmt werden, denn bei einer relativ geringen Erhöhung der Spannung ist die sprunghafte Zunahme der Mitteldehnung gut zu beobachten. Die aus den quasi-statischen Überlegungen bestimmten Grenzspannungen  $\sigma_c$  (- 150 kPa für EPS30 und - 100 kPa für EPP30) rufen bei EPS30 und EPP30 bereits Kriechen in Modus II hervor. Die im vorliegenden Fall empirisch bestimmte Spannung, bei der gerade noch der Kriechmodus I vorliegt, beträgt - 112 kPa für EPS30 und - 74 kPa für EPP30. Zur besseren Abgrenzung von der kritischen Spannung aus dem quasi-

statischen Versuch  $\sigma_c$  wird für diese „dynamische“ kritische Spannung die Abkürzung  $\sigma_k$  eingeführt.



**Abbildung 50** Übergang des Kriechmodus von I nach II.

In der Literatur ist noch offen, wie aus den quasi-statischen Kenngrößen kritische Belastungsniveaus schwingend belasteter Partikelschäume abgeleitet werden können. Mittels nachstehender Rechnung wird es erstmals für EPS30 und EPP30 möglich, die maximale Unterspannung im Ermüdungsversuch vorherzusagen, bei der es nur zu einer minimalen Änderung in der Mitteldehnung kommt, also Kriechmodus I vorliegt. Hierzu wird das Verhältnis aus den Spannungen  $\sigma_c$  und  $\sigma_k$  gebildet:

$$2u\pi = \frac{\sigma_c}{\sigma_k}, \quad u = 21,3 \cdot 10^{-2} \quad (11)$$

Dabei steht das Subskript „c“ für die kritische Spannung aus dem quasi-statischen Versuch und das Subskript „k“ für die maximale Unterspannung im Ermüdungsversuch. Eine erste

Abschätzung ergibt somit, dass die hier verwendeten Partikelschäume im Dauerschwingversuch nur mit rund 75 % der kritischen Spannung aus dem quasi-statischen Versuch belastet werden sollten.

Dieser Faktor „u“ kann zusätzlich abhängig von der Prüffrequenz sein. Dieser Aspekt muss jedoch in weiteren Arbeiten beleuchtet werden. Eine Abschätzung zu langsameren Prüffrequenzen sollte jedoch bereits jetzt möglich sein. Je langsamer geprüft wird, desto geringer sollten die Mitteldehnungen ausfallen. Somit ist der Korrekturfaktor bis 5 Hz sicher verwendbar.

#### 6.4.5 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt ist der Einfluss der Mittelspannung und der Spannungsamplitude auf das Ermüdungsverhalten von EPS30 und EPP30 bestimmt worden. Unterhalb der dynamischen kritischen Spannung  $\sigma_k$  ist das dynamische Kriechen durch den Kriechmodus I beschreibbar. Oberhalb der kritischen Spannung verändert sich die dynamische Kriechrate für beide Partikelschäume. Der exponentielle Abfall der Mitteldehnung im überkritischen Bereich ist als Funktion der Mittelspannung und Spannungsamplitude für EPS30 und EPP30 über eine einfache abfallende Exponentialfunktion beschreibbar.

Veränderungen in der Mittelspannung wirken sich stärker auf die Mitteldehnung von EPS30 aus und weniger stark auf die Mitteldehnung von EPP30. Weiterhin ist EPS30 sensitiver gegenüber Veränderungen in der Spannungsamplitude. Grundsätzlich unterschiedlich ist die Temperaturabhängigkeit. EPP30 zeigt eine Veränderung in den mechanischen Kenngrößen als Funktion der Temperatur. Eine nur geringe Verringerung der Labortemperatur führte zu einer Versteifung des EPP und somit zu einer messbaren Zunahme der energiebezogenen Kenngrößen.

Die gezeigten Effekte lassen sich vermutlich direkt auf die Polymerstruktur zurückführen. Das EPS30 ist ein amorpher Partikelschaum, der seine Glasübergangstemperatur weit über Raumtemperatur hat. Es ist somit bei den Messungen spröder und folglich auch empfindlicher gegenüber Änderungen in der Belastungshöhe. EPP30 jedoch ist ein teilkristalliner Partikelschaum. Die Glasübergangstemperatur liegt unterhalb der Raumtemperatur. Die amorphen Bereiche sind bei der Prüfung somit in einem entropieelastischen Zustand und

reagieren folglich empfindlicher auf Änderungen in der Temperatur und der Mittelspannung. Gleichzeitig verleiht diese Elastizität dem EPP30 eine höhere Resistenz gegenüber der Variation der Spannungsamplitude.

Schließlich wurde der Übergang des Kriechmodus von I nach II mittels graphischer Auswertung der Mitteldehnung bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass es einen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen aus den quasi-statischen Versuchen und der Belastungshöhe bei dauerhaft schwingender Belastung gibt. Die Verknüpfung über die beiden kritischen Spannungen ergeben einen ersten Ansatz von  $\sigma_k = \sigma_c * 75 \%$ , der jedoch noch weiter bewiesen werden muss.

Diese neuen Erkenntnisse helfen weitere Einsatzgebiete für Partikelschäume zu schaffen. Das bisher nur für einmalige Belastungen ausgelegte EPS30 kann vermutlich auch in anderen Gebieten eingesetzt werden, wenn eine schwingende Belastung mit einer maximalen Last von - 112 kPa nicht überschritten wird. Für das hier verwendete EPP30 gilt es, Belastungen von - 74 kPa dauerhaft zu vermeiden, damit es zu keiner plastischen Deformation von mehr als 5 % im Laufe des Einsatzes kommt.

## 6.5 Modellierung des dynamischen Kriechens

Das mechanische Verhalten von Schäumen lässt sich mittels geeigneter Kombination aus Feder- und Dämpferelementen adäquat annähern. Dies wird durch das Superpositionsprinzip nach Boltzmann möglich [32, 35]. Im Folgenden wird gezeigt, dass dies auch für Partikelschäume gilt und die Mitteldehnung aus den Hysteresismessungen adäquat wiedergibt. Zunächst soll der Einfluss der Anzahl verwendeter Kelvin-Voigt-Körper auf die Genauigkeit des Modells untersucht werden. Anschließend wird das beste Modell so angewendet, dass das dynamische Kriechen von EPS30 als Funktion der Mittelspannung und Spannungsamplitude beschreibbar wird. Schließlich soll durch Extrapolation der Modellkoeffizienten für die Kelvin-Voigt-Elemente eine Vorhersage des mechanischen Verhaltens möglich werden.

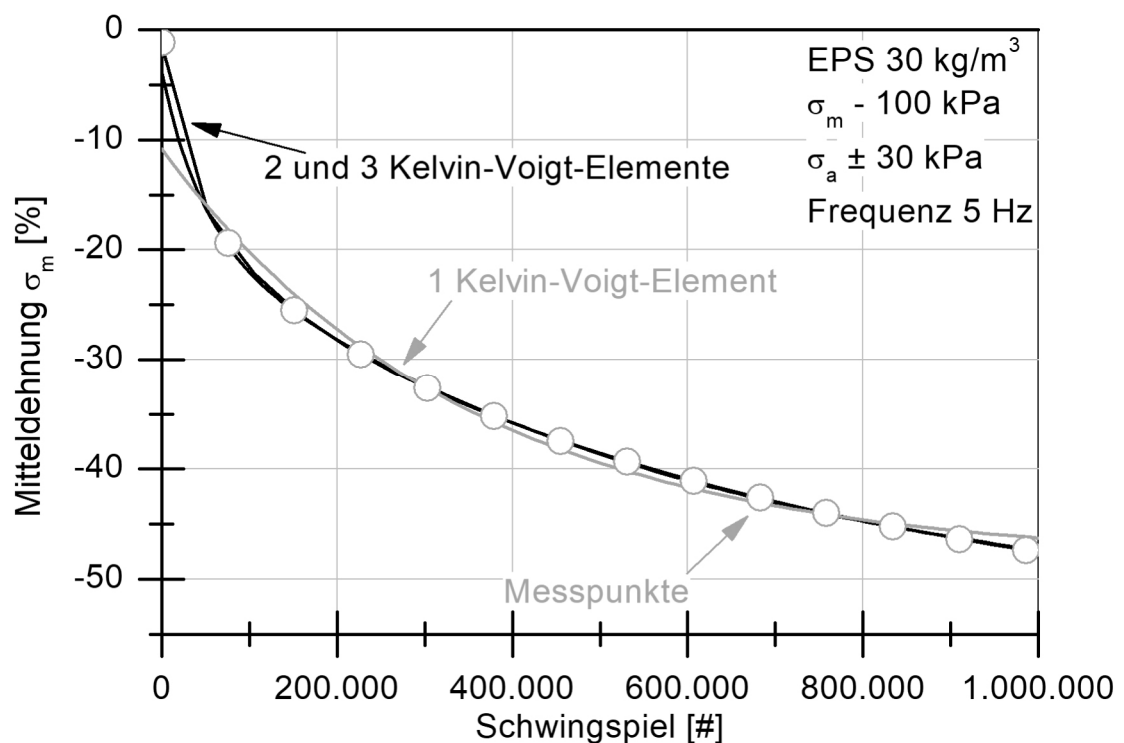
### 6.5.1 Generalisierter Kelvin-Voigt-Ansatz

Anhand eines Beispiels soll zunächst aufgezeigt werden, wie viele Kelvin-Voigt-Elemente eines generalisierten Kelvin-Voigt-Ansatzes für die adäquate Beschreibung des Materialverhaltens der verwendeten Partikelschäume nötig sind. Hierzu wird beispielhaft die Mitteldehnung von EPS30 bei einer Mittelspannung von  $-100$  kPa und einer Belastungsamplitude von  $\pm 30$  kPa gewählt und modellmäßig abgebildet. Dieser Schritt wäre auch für andere Messungen möglich gewesen. Die Auswahl für dieses Experiment erfolgte wahllos.

Abbildung 51 zeigt die gemessene Mitteldehnung von EPS30 über der Anzahl der Schwingspiele als reduzierten Datensatz mittels der Kreise in orange. Eine Fit-Kurve, bestehend aus nur einem Kelvin-Voigt-Element, ist ebenfalls in orange dargestellt. Zusätzlich in schwarz eingezeichnet sind die Regressionen der entsprechenden Kelvin-Voigt-Modelle für zwei und drei Kelvin-Voigt-Elemente. Die Modelle sind mittels Origin und der Fitting-Funktionen „ExpDec1, ExpDec2 und ExpDec3“ bestimmt worden.

Die aus den empirischen Versuchen gewonnenen Messdaten der Mitteldehnungen zeigen, wie bereits beschrieben, grundsätzlich einen exponentiellen Abfall. Wird zur Erklärung und Modellierung dieser Messpunkte das Modell mit nur einem Kelvin-Voigt-Körper (orange) verwendet, so kann dieser exponentielle Abfall jedoch nicht ausreichend abgebildet werden.

Die Abweichungen zwischen den Messpunkten und dieser einfachen Regression, insbesondere zu Beginn des Versuches, betragen mehr als 10 %. Das mechanische Verhalten zum Ende des Versuchs hin jedoch wird durch diese Funktion hinreichend beschrieben. Dennoch ist dieses Modell nicht ausreichend geeignet, um das gesamte Materialverhalten zu erklären. Mithilfe der bereits gezeigten Formänderung der Hysteresisschleife kann zudem abgeleitet werden, dass nichtlineares, viskoelastisches Materialverhalten vorliegt. Somit ist die Verwendung von wenigstens einem weiteren Kelvin-Voigt-Element nötig.



**Abbildung 51** Modellmäßige Beschreibung der Mitteldehnung von EPS30.

Bei der Verwendung von zwei Elementen des Typs Kelvin-Voigt beschreibt der Fit den Messdatensatz schon äußerst adäquat. Lediglich kleinere Abweichungen von unter 5 % zu Beginn des Versuchs sind noch zu verzeichnen. Ursächlich hierfür könnten die Regelungsimpulse des PID-Controllers in der Einregelphase sein. Da sich die Abweichungen jedoch auf die ersten Schwingspiele begrenzen, kann dieser Fehler vernachlässigt werden. Der neue Fit konvergiert bereits nach wenigen Iterationen und die Qualität des Modells liegt bei einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 > 99$  %. Hinsichtlich des Rechenaufwandes und der nötigen

Speicherung von nur 5 Koeffizienten (1x Feder, 2x Amplituden, 2x Zeitkonstanten) pro Versuch stellt das Modell einen optimalen Kompromiss dar.

Noch ein weiteres Element mit in die phänomenologische Modellbildung aufzunehmen, scheint die Genauigkeit der Vorhersage nur scheinbar zu verbessern. Die Abweichungen zwischen Messpunkten und Regression mit drei Kelvin-Voigt-Elementen zu Beginn und zum Ende der Messungen von weniger als 2 % sind mit Vorsicht zu genießen. Da die Regression des 3-Elemente-Modells nicht konvergiert, ist die Bestimmung der Koeffizienten nicht für alle Punkte eindeutig. Der Fit mit drei Kelvin-Voigt-Grundelementen ist somit überbestimmt und damit ungültig.

Die optimale Anzahl an Kelvin-Voigt-Elementen zur Beschreibung der Mitteldehnung  $\sigma_{Mitte}(Z)$  zu einem beliebigen Schwingenspiel  $Z$  liegt folglich bei nur zwei Elementen. Die Mitteldehnungen zu einem beliebigen Schwingenspiel lassen sich also mittels einer Gleichung des folgenden Typs adäquat beschreiben:

$$\sigma_{Mitte}(Z) = F_0 + A_1 e^{-Z/\tau_1} + A_2 e^{-Z/\tau_2} \quad (12)$$

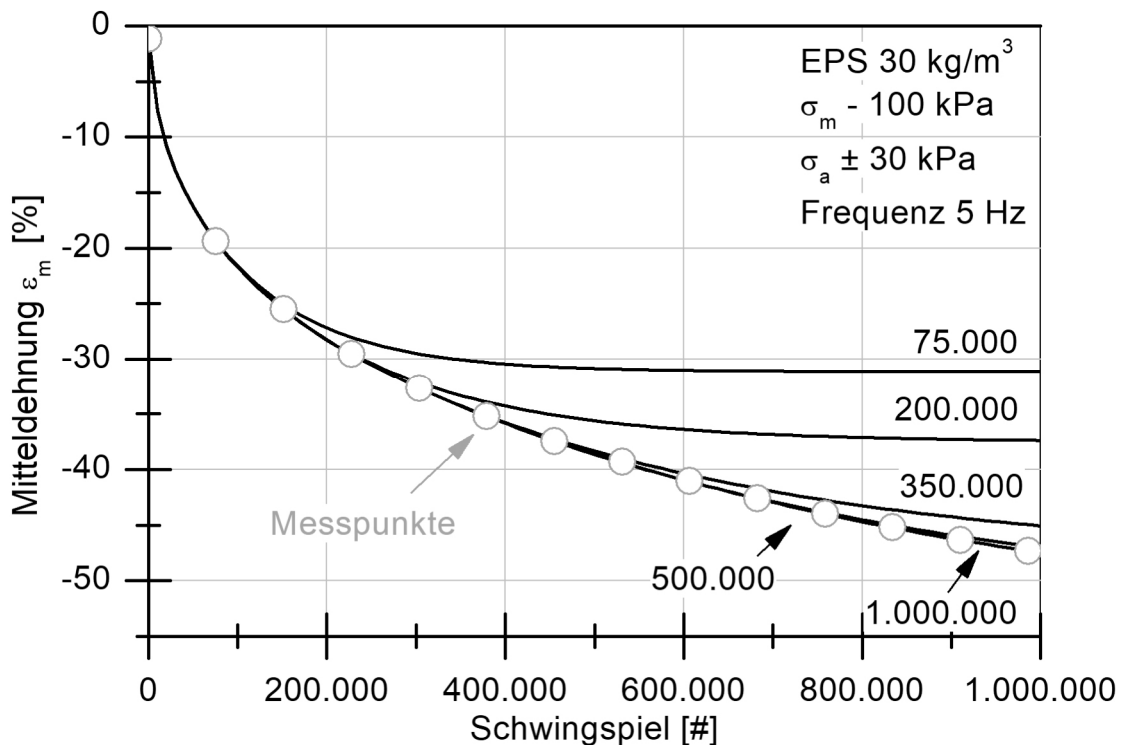
Die Federkraft  $F_0$  ist zur Beschreibung des asymptotischen Grenzwerts, den die Funktion nach Ablauf einer unendlichen Zeit erreicht, notwendig. Die Koeffizienten  $A_1$  und  $A_2$  vor den e-Funktionen stehen für die jeweiligen (Dehnungs-)Amplituden [%] und somit direkt für deren Einfluss auf die Modellvorhersage. Die Zeitkonstanten  $\tau_1$  und  $\tau_2$  zeigen die Geschwindigkeit an, mit der die jeweilige e-Funktion abfällt. Hierbei gilt: Je kleiner die Zeitkonstante [in Schwingenspielen] ist, desto schneller ist der Effekt der e-Funktion auf die Modellvorhersage abgeklungen. In Abschnitt 6.5.3 wird noch genauer auf die physikalische Bedeutung der einzelnen Elemente eingegangen.

### 6.5.2 Einfluss der Messdatenmenge auf die Modellgenauigkeit

Das im vorherigen Abschnitt bestimmte Modell zur Beschreibung der Mitteldehnung soll noch auf seine Robustheit untersucht werden. Es bleibt die Frage offen, ob es möglich ist, die Ermüdungsversuche auch mit einer geringeren Anzahl an Schwingenspielen durchzuführen

und anschließend das Materialverhalten, auf Basis der Fitting-Funktion, zu extrapolieren. Die Reduktion der Prüfzeit ist im Wesentlichen wirtschaftlich getrieben.

Beispielhaft soll die Reduktion der Messdaten an dem im vorherigen Abschnitt bestimmten Modell von EPS30 erfolgen. Jedoch wird bei der Berechnung der Fitting-Funktion nur ein reduzierter Messdatensatz als Eingabe verwendet. Abbildung 52 zeigt die gemessene Mitteldehnung von EPS30 als Funktion der Schwingspiele (orange Kreise). Die Fitting-Funktionen zu den reduzierten Datensätzen sind in schwarz eingetragen. Die mittels reduzierten Datensatzes individuell bestimmten Koeffizienten werden verwendet, um das Materialverhalten auch für die gesamte Messdauer von 1 Mio. Schwingspiele zu extrapolieren.



**Abbildung 52** Mitteldehnung von EPS30 als Funktion der Eingabemenge.

Die Anzahl der Schwingspiele, die zur Berechnung des mechanischen Verhaltens zur Verfügung gestellt werden, haben einen großen Einfluss auf die Vorhersagbarkeit der Mitteldehnung. Wie zu erwarten ist, kann bei der Eingabe aller zur Verfügung stehender Mess-



daten der beste Fit der gemessenen Mitteldehnung erzeugt werden. Die Reduktion der Eingabe auf 500.000 Schwingspiele zur Bestimmung der Fitting-Funktion zeigt bereits, dass eine geringe Abnahme der Genauigkeit am Ende des Versuches präsent ist. Die Abweichung zwischen der originalen Fitfunktion und der reduzierten Vorhersage liegt bei Bruchteilen von 1 %. Diese Abweichung wird sicherlich toleriert und liegt noch innerhalb der Streuung der Messwerte (nicht eingezeichnet) selbst. Wird die Anzahl der Messpunkte deutlich reduziert, so zeigt sich eine immer größere Abweichung zwischen dem berechneten und extrapolierten Modell und den gemessenen Werten nach 1 Million Schwingspielen. Der asymptotische Grenzfall, der durch die Feder  $F_0$  beschrieben wird, wird immer schlechter bestimmt, je weniger Schwingspiele als Berechnungsgrundlage zur Verfügung gestellt werden.

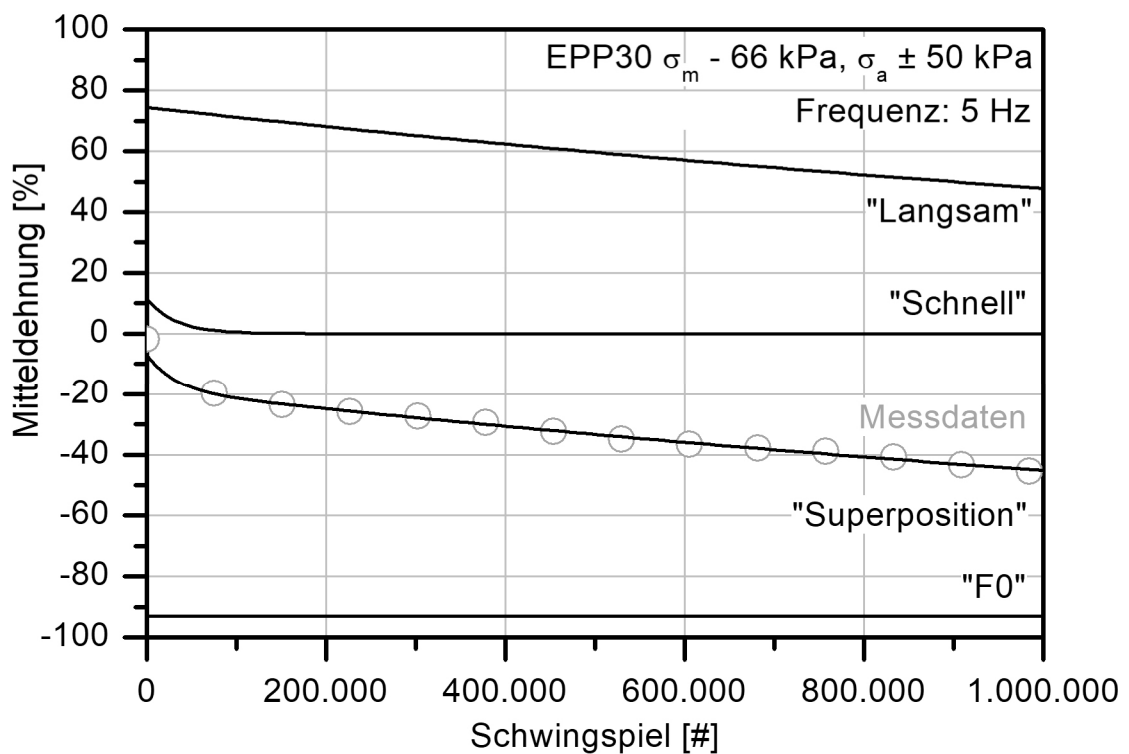
Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass das Modell, bestehend aus zwei abfallenden e-Funktionen und einem Feder-Element, sich hervorragend dazu eignet, die Mitteldehnung von Partikelschäumen zumindest phänomenologisch vorherzusagen. Es ist sogar möglich, eine Extrapolation der Messdaten durchzuführen und somit den Versuchszeitraum virtuell zu erweitern. Jedoch mit der Einschränkung, dass die Extrapolation nur so lange gültig ist, bis der Versuchsraum maximal verdoppelt ist. So kann im Falle des Modells mit 75.000 Schwingspielen als Eingabe das mechanische Verhalten von EPS30 bis etwa 150.000 Schwingspiele sehr gut abgeschätzt werden. Im Falle von 500.000 Schwingspielen bedeutet dies, dass der Versuch bis zu 1 Mio. Schwingspielen vorhersagbar ist. Dies bedeutet ferner, dass es in Zukunft möglich wäre, die Versuchsdauer bei der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Partikelschäumen wenigstens zu halbieren. Die Halbierung der Prüfzeit ist von sehr hohem wirtschaftlichem Interesse, weil sich hierdurch die Anzahl der Messungen an der sehr kostenintensiven servo-hydraulischen Prüfmaschine innerhalb der gleichen Zeitspanne verdoppeln würde.

Werden diese Extrapolationsmöglichkeit mit dem hier vorgestellten Multi-Tool kombiniert, so ist eine Reduktion der Prüfzeit um den Faktor 10 bei der Bestimmung der Mitteldehnung der Partikelschäume sicher möglich.

### 6.5.3 Physikalische Bedeutung der identifizierten Modell-Elemente

Das Superpositionsprinzip nach Boltzmann ermöglicht im vorliegenden Fall, die Messwerte der Mitteldehnung adäquat mittels einer Feder und zweier abfallender e-Funktionen zu beschreiben. Zur Verdeutlichung der einzelnen gleichzeitig auftretenden Effekte sind die Einzelfunktionen aus Formel 12 (sh. Seite 99) beispielhaft für EPP30 bei einer Belastung von  $-66 \text{ kPa} \pm 50 \text{ kPa}$  in Abbildung 53 getrennt voneinander aufgezeigt.

Die Feder  $F_0$  zeigt hierbei den Wert von  $-93 \%$  Dehnung an. Dieser Wert wird nach einer sehr langen Zeit angenähert, nämlich nach Abklingen der e-Funktionen. Es handelt sich hierbei um den asymptotischen Grenzfall, welcher aus den Messwerten über die bereits beschriebene Regression ermittelt wird. Anhand dieses Wertes ist es nun leicht abzuschätzen, wie hoch die finale Verdichtung der Probe wäre, wenn der Versuch nie gestoppt würde. Für eine konstruktive Auslegung ist dieser Wert ebenfalls von besonderer Wichtigkeit und sollte nur wenige Prozent betragen.



**Abbildung 53** Modellvorstellung und Einzelkomponenten der Modellvorhersage.

Der deutlich „schnellere Effekt“ wird durch eine e-Funktion beschrieben, deren Zeitkonstante nur rund 32.150 Schwingspiele (= 1,8 Stunden bei 5 Hz) beträgt. Er klingt bereits nach rund 150.000 Schwingspielen (= 9 Stunden) auf unter 0,7 % ab. Dies entspricht dem Fünffachen der spezifischen Zeitkonstante. Eine abfallende e-Funktion hat zu diesem Zeitpunkt bereits 99,3 % der anfänglichen Amplitude abgebaut. Dies ist in Abbildung 53 auch deutlich zu erkennen. Darüber hinaus ist die Amplitude des Effektes relativ gering (13 %). Jedoch ist die Einbindung dieser Komponente zwingend nötig, um das mechanische Verhalten insbesondere zu Beginn des Versuches adäquat zu beschreiben.

Die durch den schnellen Effekt hervorgerufenen Einlaufeffekte zu Beginn der Messung sind nicht direkt auf Veränderungen in der Temperatur innerhalb der Probe zurückzuführen. Weder EPS30 noch EPP30 zeigen innerhalb der ersten 150.000 Schwingspiele einen so deutlichen Anstieg in der Temperatur. Randbedingung der Versuche war es zudem, den Temperaturanstieg auf maximal 5 °C zu begrenzen. Von daher kann die Erwärmung als möglicher Einflussfaktor ausgeschlossen werden. Eine andere Möglichkeit besteht in der Zerstörung von individuellen Zellen innerhalb der Partikelschäume und die damit verbundene Freisetzung von eingeschlossenem Zellgas. Die plastische Deformationsrate ist insbesondere zu Beginn der Belastung am größten und nimmt im Verlauf der Versuche weiter ab. Dies ist auch anhand der zyklischen Versuche im quasi-statischen Lastfall zu erkennen, bei denen die plastische Deformation von EPS30 und EPP30 bereits mittels einer e-Funktion hinreichend approximiert wurde. Der schnelle Effekt ist folglich auf die Veränderung der Morphologie zurückzuführen. Bouix et al. zeigen beispielsweise, dass eingeschlossenes Zellgas bereits ab der ersten Verdichtung von nur wenigen Prozent aus den Proben austritt [29].

Die Zeitkonstante für den „langsamen Effekt“ beträgt rund 2.260.000 Schwingspiele. Dies entspricht etwa 125 h Laufzeit bei der vorliegenden Prüffrequenz von 5 Hz. Somit klingt der Effekt dieser langsamen Komponente nach 625 h auf 99,3 % ab und entsprechend nahezu vollständig aus. Der Anteil dieser Modellkomponente zur Beschreibung der Mitteldehnung ist sehr hoch und erklärt den Großteil (ca. 80 %) des gemessenen Verlaufs.

Dieser langsame Deformationseffekt, der erst nach 625 h abgeklungen zu sein scheint, kann einem dem Kriechen sehr ähnlichen Effekt zugeschrieben werden. Durch die immerwährende Mittelspannung können Molekülketten nach und nach aneinander abgleiten. Das

gezeigte Kriechen könnte eine Folge der schwachen Bindungskräfte zwischen den Molekülketten sein. Dennoch ist die im dynamischen Belastungsfall ermittelte Kriechrate deutlich größer, als es für den quasi-statischen Belastungsfall z. B. durch Krollmann [26] gezeigt wurde. Trotzdem beschreibt die langsame Komponente einen Verlauf, der dem Kriechmodus II entspricht. Die Überlagerung von einer schwingenden Belastung mit einer statischen Mittellast hat eine höhere plastische Deformation zur Folge als eine statische Mittellast alleine. Folglich verhalten sich auch polymere Partikelschäume wie andere Werkstoffe unter dynamischer Ermüdung: Die dynamisch ermittelte Lebensdauer ist stets kleiner als die statisch ermittelte.

Durch die Anwendung des Superpositionsprinzips ist es erstmals möglich, die Mitteldehnung von Partikelschäumen aus EPS30 und EPP30 adäquat mittels eines konstitutiven Modells phänomenologisch zu beschreiben. Darüber hinaus ist durch die Verwendung von nur zwei e-Funktionen ein anschauliches Modell entstanden, welches die Deformationsmechanismen im Partikelschaum darzustellen vermag.

#### 6.5.4 Modellierung der Mitteldehnung

In den vorherigen Abschnitten wurde ein phänomenologisches Modell entwickelt, das die Mitteldehnungen aus zyklischen Ermüdungsversuchen von EPS30 und EPP30 in einem Versuch beschreibt. In diesem Abschnitt soll gezielt der Einfluss der Spannungsamplitude auf das Modell und die Auswirkungen auf die Koeffizienten diskutiert werden.

Für die allgemeine Modellierung der Mitteldehnung von EPS30 und EPP30 in Abhängigkeit von der Spannungsamplitude bei konstanter Mittelspannung werden zunächst für alle Messungen die Koeffizienten, analog zur beschriebenen Vorgehensweise, bestimmt. Die Koeffizienten für das Feder-Element sowie die jeweiligen Amplituden und Zeitkonstanten der e-Funktionen sind der folgenden Tabelle 5 zu entnehmen. Anhand dieser Koeffizienten ist es möglich, die Mitteldehnung von EPS30 und EPP30 über 1 Mio. Schwingspiele als Funktion der Spannungsamplitude darzustellen.

**Tabelle 5** Modellkoeffizienten von EPS und EPP.

	$\sigma_m$	$\pm \sigma_a$	$F_0$	$A_1$	$\tau_1$	$A_2$	$\tau_2$
	[kPa]	[kPa]	[%]	[%]	[Schwingspiel]	[%]	[Schwingspiel]
<b>EPS30</b>	100	$\pm 20$	-23,09	6,12	$5,7 \cdot 10^4$	13,99	$4,8 \cdot 10^5$
		$\pm 35$	-30,20	5,71	$3,9 \cdot 10^4$	17,53	$6,5 \cdot 10^5$
		$\pm 50$	-53,65	13,93	$4,5 \cdot 10^4$	35,80	$5,8 \cdot 10^5$
		$\pm 80$	Keine Modellierung möglich, da Versuchsabbruch				
<b>EPP30</b>	66	$\pm 17$	-38,20	4,80	$3,9 \cdot 10^4$	29,95	$5,9 \cdot 10^5$
		$\pm 33$	-46,01	8,36	$2,3 \cdot 10^4$	33,46	$6,7 \cdot 10^5$
		$\pm 50$	-93,00	11,33	$3,2 \cdot 10^4$	74,43	$22,6 \cdot 10^5$

Der Wert für die Feder  $F_0$  steigt allgemein mit zunehmender Spannungsamplitude an. Da EPP30 jedoch sensibler gegenüber Änderungen der Spannungsamplitude ist, ist hier der Anstieg deutlich stärker.

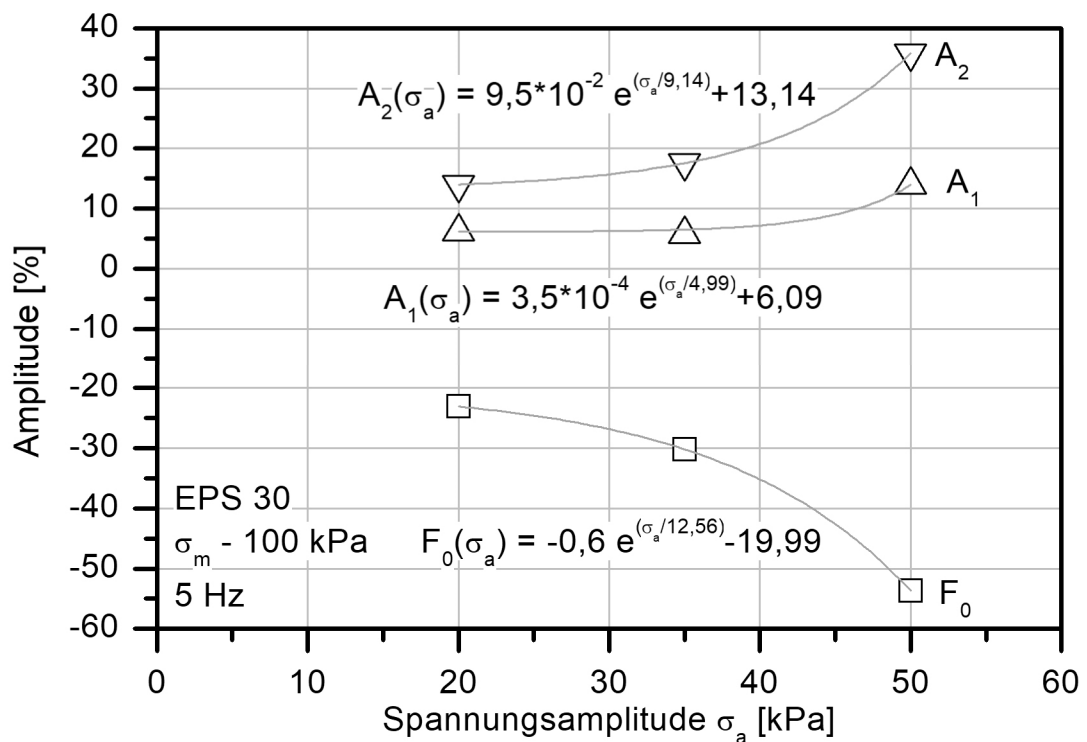
Durch den Unterschied im Verlauf der Mitteldehnung zwischen EPS30 und EPP30 sind auch die Koeffizienten für die e-Funktionen leicht unterschiedlich. Der durch  $A_1$  und  $\tau_1$  beschriebene Effekt, der deutlich schnellere also, ist bei EPP30 grundsätzlich von kürzerer Zeitdauer. Im vorigen Abschnitt wurde dieser Effekt der Änderung der Morphologie und der damit einhergehenden Dämpfung zugeschrieben. Eine noch zu klärende Hypothese lautet, dass die Dämpfung mit dem eingeschlossenen Zellgas und der Gaspermeabilität von EPP in Verbindung steht. Die Hypothese lautet konkret: EPP30 nimmt weniger schnell Zellgas auf, deshalb erschlafft das Schaumnetzwerk eher. Hierdurch werden die vergleichsweise hohen Mitteldehnungen zu Beginn der Messungen zumindest erklärbar.

Der langsamere, durch  $A_2$  und  $\tau_2$  beschreibbare Effekt, hat bei EPS30 einen geringeren Einfluss auf die Mitteldehnung. Außerdem scheint die Zeitkonstante  $\tau_2$  bei EPS30 nahezu unabhängig von der Spannungsamplitude zu sein. Dies kann durch den spröden Zustand, in dem sich das EPS30 bei Raumtemperatur befindet, erklärt werden.

### 6.5.5 Erweiterung des phänomenologischen Modells

Die folgende Evolution des in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Modells sieht vor, dass das Materialverhalten nun in einen größeren Bereich extrapoliert wird. Somit sind Mitteldehnungen vorhersagbar, die nicht explizit gemessen wurden. Hierzu werden die empirisch bestimmten Messwerte als Grundlage verwendet. Anhand der für die Modelle identifizierten Parameter für Feder- und Dämpferkoeffizienten aus dem vorherigen Abschnitt sollte es nun möglich sein, eine Extrapolation dieser derart durchzuführen, dass das gesamte Prüffeld modellierbar wird. Dies wird für EPS30 exemplarisch am Einfluss der Spannungsamplitude bei konstanter Mittelspannung von 100 kPa gezeigt.

Die für die phänomenologischen Modelle zugrundeliegenden Koeffizienten werden zunächst in einem Diagramm aufgetragen, so dass eine entsprechende Regression möglich wird. Abbildung 54 zeigt die Modellkoeffizienten (offene Dreiecke) am Beispiel der Amplituden  $A_1$ ,  $A_2$  sowie der Feder  $F_0$ .



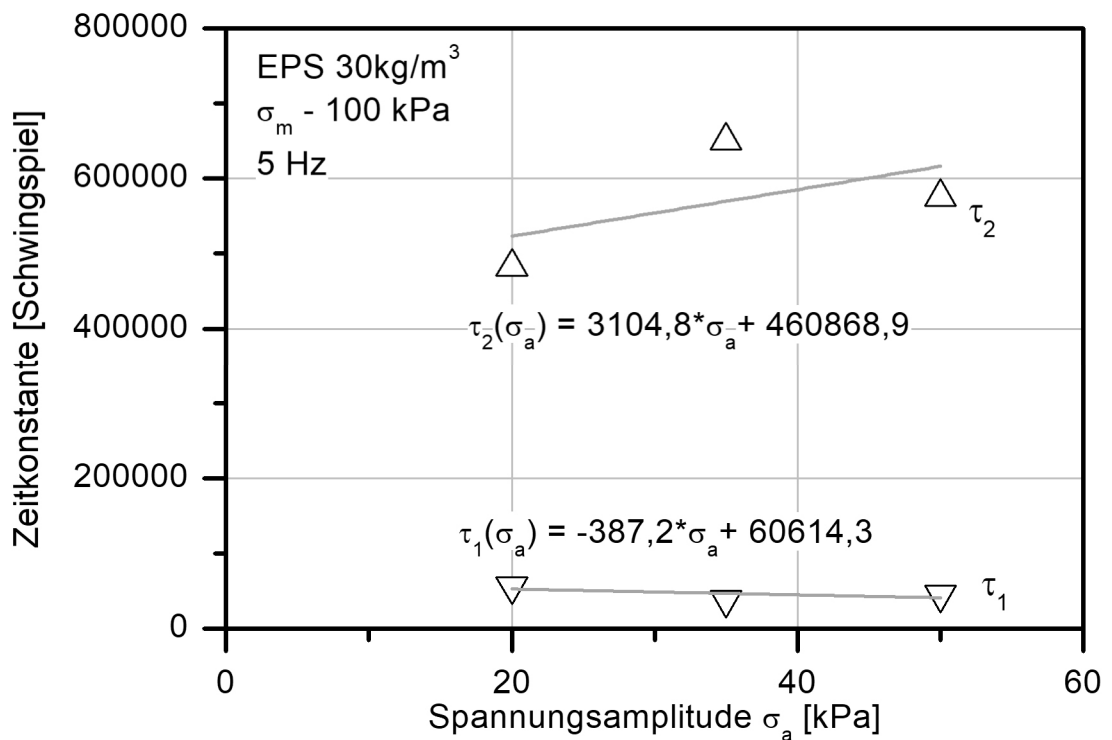
**Abbildung 54** Vorhersage der Modellkoeffizienten „Amplitude“ für EPS30.

Die zugehörigen exponentiellen Regressionen (orange) sind ebenfalls in Abbildung 54 mit eingezeichnet.

Für den theoretischen Fall einer Spannungsamplitude von 0 kPa addieren sich die Amplituden der so ermittelten Regressionen auf einen Wert von -0,7 %. Dieser Wert entspricht etwa dem von Krollmann [26] gezeigten Wert für das statische Kriechen von EPS bei kurzer Belastungsdauer bei ähnlicher statischer Last. Die Extrapolation der Koeffizienten mit exponentieller Regression scheint somit plausibel.

Die Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Amplituden  $A_1$  und  $A_2$  sowie der Federkraft  $F_0$  sind in Abbildung 54 dargestellt. Mit Hilfe dieser Gleichungen wird es möglich, zu einer beliebigen Spannungsamplitude die zugehörigen Modellkoeffizienten abzuleiten.

Abbildung 55 zeigt die Modellkoeffizienten (offene Dreiecke) der berechneten Zeitkonstanten und die lineare Extrapolation (orange) derselben als Funktion der Spannungsamplitude. Die Zeitkonstante  $\tau_1$  zeigt auf der relativ groben Skala einen scheinbar nahezu konstanten Verlauf.



**Abbildung 55** Vorhersage der Modellkoeffizienten "Zeitkonstante" für EPS30.

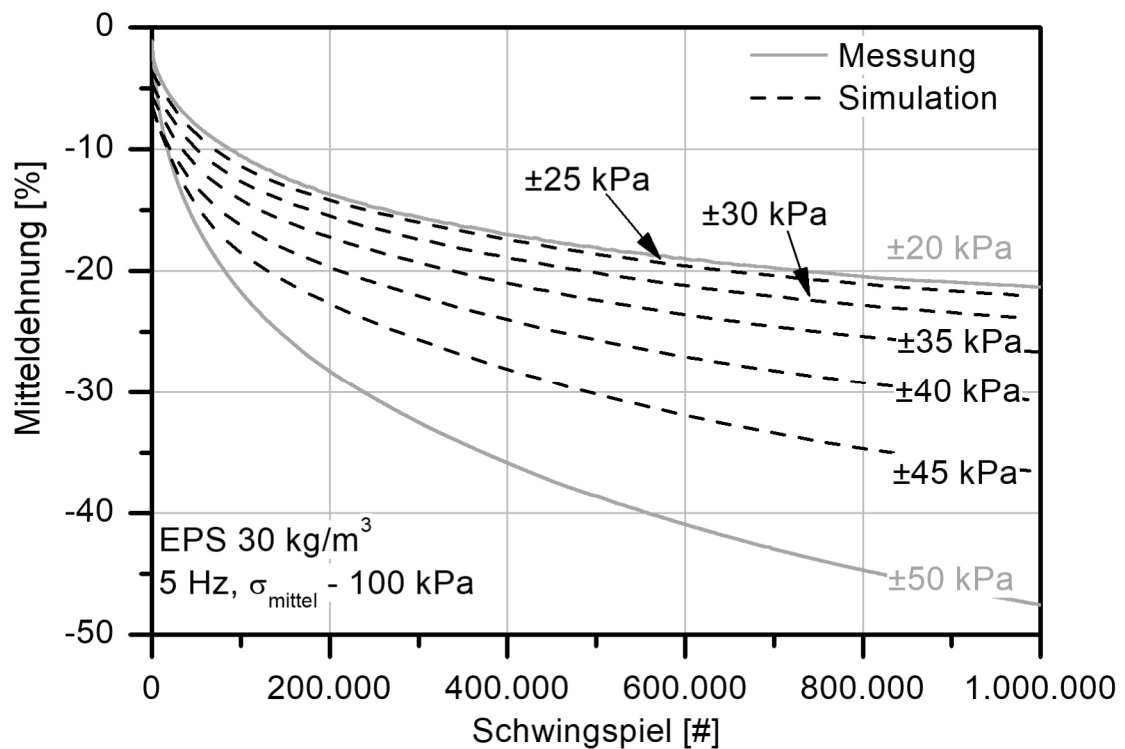
Die negative Steigung ist aber gut mittels einer linearen Regression zu beschreiben, deren Steigung einen deutlich negativen Wert aufweist. Mit der Abnahme der Zeitkonstanten  $\tau_1$  als Funktion der Spannungsamplitude wird auch der schnellere Effekt noch weiter beschleunigt. Die mikromechanischen Deformationsphänomene im Partikelschaum werden innerhalb des gemessenen Fensters um rund 20 % beschleunigt. Dies lässt sich ferner durch die größere Deformationsamplitude begründen, die das Schaumnetzwerk pro Schwingenspiel stärker in Mitleidenschaft zieht.

Die Modellierung der Zeitkonstanten  $\tau_2$  hingegen gestaltet sich etwas schwieriger. Eine exponentiell steigende oder fallende Abhängigkeit scheint nicht vorzuliegen. Es wird daher zunächst der einfachste Fall mit einer linearen Regression angenommen. Hierdurch wird zwangsweise ein Fehler im Modell vorhanden sein. Da es sich bei der Zeitkonstanten aber um den langsamen Effekt handelt, sollte sich eine kleine Abweichung an dieser Stelle jedoch nicht so stark auf die Modellvorhersage auswirken.

Durch die Berechnung von Regressionsgleichungen für alle notwendigen Modellkoeffizienten ist es nun erstmals möglich, das Materialverhalten von EPS30 auch für noch nicht gemessene Bereiche abzuschätzen. Hierfür wird lediglich der gewünschte und zu modellierende Belastungszustand in die entsprechende Regressionsgleichung jedes Koeffizienten eingegeben. Diese spezifischen Modellkoeffizienten müssen anschließend nur noch mittels Superposition über die gewünschte Anzahl an Schwingspielen aufgetragen werden. Dies wird exemplarisch für EPS30 mit einer Mittelspannung von 100 kPa und einer Variation der Spannungsamplitude zwischen - 20 kPa und - 50 kPa durchgeführt.

Abbildung 56 zeigt jeweils die originalen Messkurven zur Orientierung in orange und die extrapolierten Modellkurven in schwarz. Es ist zu beachten, dass die vorgenommenen Modellbildungen auf Messungen von 1 Mio. Schwingspielen beruhen. Wie bereits gezeigt wurde, könnte diese Extrapolation der Messkurven auch auf einen Prüfraum von 2 Mio. Schwingspielen virtuell erweitert werden.





**Abbildung 56** Vorhersage der Mitteldehnung von EPS30.

#### 6.5.5.1 Grenzen des Modells

Die phänomenologische Modellierung der Mitteldehnung ist sicherlich interessant. Jedoch sind die Grenzen der per Regression bestimmten Koeffizienten zu beachten. Da die Bestimmung auf nur einer relativ geringen Anzahl an Stützpunkten beruht, kann eine mögliche Fehlerquelle die lineare Interpolation von  $\tau_2$  sein, mit der die Modellierung erst möglich wird. Außerdem sollte das Modell nur innerhalb der maximal bestimmten extremen Messwerte (also zwischen - 20 kPa und - 50 kPa) liegen.

Weiterhin ist zu beachten, dass die gezeigten Modelle nur für eine Prüffrequenz von 5 Hz gelten. Partikelschäume zeigen ein geschwindigkeitsabhängiges Materialverhalten. Insbesondere wenn Deformationsgrenzen lokal überschritten werden, treten weitere Effekte wie Druckspannungsfließen auf. Unter diesen Umständen kann das vorliegende Modell keine glaubhaften Vorhersagen erzeugen.

Schließlich spielen die Dichte und die anfängliche Morphologie der Partikelschäume bei der mechanischen Charakterisierung eine ebenso wichtige Rolle. Die allgemeine Vorgehensweise zur Bestimmung des Modells mag sicherlich für andere Partikelschäume gültig sein, die Übertragbarkeit der in dieser Arbeit bestimmten spezifischen Koeffizienten ist es vermutlich nicht.

#### 6.5.6 Zusammenfassung

Die Mitteldehnung von EPS30 und EPP30 als Funktion der Mittelspannung und der Spannungsamplitude kann mit einem Feder-Dämpfer-Modell beschrieben werden. Zur Beschreibung sind dabei nur zwei exponentiell abfallende Elemente des Typs Kelvin-Voigt und ein Federelement notwendig. Die physikalische Bedeutung der Kelvin-Voigt-Elemente kann in zwei Kategorien eingeteilt werden: Der schnellere Effekt ist auf das gesamtheitliche Verformen der Schaumpartikel im Formteil als Folge der Druckbelastung zurückzuführen. Der langsamere Effekt hingegen spiegelt das zyklische Kriechen und somit das Kriechen im Polymeren selbst wider.

Die hohe Robustheit des Modells hat zur Folge, dass die Prüfung der Formteile bereits nach der Hälfte der Schwingspiele beendet werden könnte. Die zweite Hälfte kann durch die virtuelle Erweiterung des Modells erfolgen. Somit lassen sich durch die Verwendung des neuen Modells 50 % der kostbaren Prüfzeit einsparen.

Mittels weiterer Extrapolation der Modellkoeffizienten ist es möglich, die Mitteldehnung im gesamten Messfeld vorherzusagen. Somit wäre bei einer zukünftigen Materialneuentwicklung oder der Prüfung anderer Einflüsse lediglich ein reduzierter Satz an Messungen auf der servo-hydraulischen Prüfmaschine nötig. Die restlichen Parameter können durch gezielte Extrapolation ermittelt werden. Mit der vorgestellten Vorgehensweise kann die Prüfzeit auf den kostspieligen Anlagen nun auf ein Minimum reduziert werden.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die notwendigen wissenschaftlichen Grundlagen für die ingenieurmäßige Auslegung der Lebensdauer von schwingend belasteten Formteilen aus Partikelschäumen zu schaffen. Kern dieser Arbeit liegt in der experimentellen Bestimmung der mechanischen Druckeigenschaften von zwei grundsätzlich verschiedenen Partikelschäumen (EPS und EPP) bei gleicher Dichte ( $30 \text{ kg/m}^3$ ) sowie in der Erstellung und Validierung eines Modells zur Vorhersage der mittleren Deformation als Funktion der Druckbelastung.

Die Auswahl der Partikelschäume erfolgte bewusst so, dass sie sich in möglichst vielen Eigenschaften gleichen. Somit kann gezielt der Einfluss des Grundpolymers auf die vorgenommenen Messungen erörtert werden. Deshalb wurde EPS und EPP bei einer Dichte von  $30 \text{ kg/m}^3$  verwendet. Ausgehend von den für EPP und EPS aus der Literatur bekannten quasi-statischen Untersuchungen wurden für die hier betrachteten Partikelschäume erweiterte Untersuchungen an einer universellen Prüfmaschine durchgeführt. Die Verwendung eines neuen Probenhalters ermöglichte erstmals die Prüfung von mehreren Prüfkörpern gleichzeitig. Die Zeitersparnis ist vor allem von wirtschaftlichem Interesse und besonders bei der Entwicklung neuer Materialvarianten attraktiv.

Durch die Anwendung der Auswertemethoden nach Lazan wurden mechanische Eigenschaften aus der Formänderung der Hysteresisschleife erstmals auch im quasi-statischen Bereich bestimmt. Die Verläufe der Dämpfung, der Speicher- und Verlustarbeit sowie der plastischen Deformation wurden mittels exponentieller Funktionen beschrieben. Eine mögliche kritische Belastungsgrenze, ab der sich das mechanische Verhalten in der Ermüdungsprüfung substantiell ändert, wurde erfolgreich identifiziert.

Die sich anschließenden dynamischen Hysteresismessungen an einer servo-hydraulischen Prüfmaschine und die konsequente Anwendung der Auswertemethode nach Lazan zeigten spezifische Unterschiede im mechanischen Verhalten der beiden Partikelschäume auf. Die Mitteldehnungen von EPS30 und EPP30 wurden aus der Formänderung der Hysteresis-

schleife als Funktion der Mittelspannung und der Spannungsamplitude bestimmt. Grundsätzlich war der Verlauf der Mitteldehnung bei beiden Materialien ähnlich und folgte den bereits aus quasi-statischen Versuchen bekannten exponentiell abfallenden Verläufen. EPS30 reagierte jedoch stärker auf Veränderungen in der Spannungsamplitude als EPP30. Umgekehrt reagierte EPP30 deutlich stärker auf die Variation der Mittelspannung. Die gezeigten Abhängigkeiten sind durch die unterschiedliche Glasübergangstemperatur zu erklären. Damit einhergehend ist die Elastizität der Materialien bei den Prüfbedingungen grundsätzlich verschieden, was sich im mechanischen Verhalten niederschlägt. Ferner muss auch die Morphologie der beiden Partikelschäume als Ursache für die Unterschiede in Betracht gezogen werden.

Zur Realisierung des generalisierten Feder-Dämpfer-Modells wurden in dieser Arbeit gezielt die Auswirkungen unterschiedlicher Kombinationen aus Mittelspannungen und Spannungsamplituden auf die dynamische Ermüdung untersucht. Basierend auf den Studien zur Ermüdung wurde ein physikalisches Modell gefunden, mithilfe dessen die Modellbildung zum Einfluss der Mittelspannung und der Spannungsamplitude durchgeführt wurde. Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Modellierungsversuche belegen, dass die mechanischen Untersuchungen problemlos in Feder-Dämpfer-Modelle übertragbar sind. Die physikalisch wirkenden Effekte wurden auf morphologische Veränderungen und auf dynamisches Kriechen eingeschränkt. Für die diskutierten Ansätze zur Entwicklung phänomenologischer Modelle zur Vorhersage des mechanischen Ermüdungsverhaltens von schwingend belasteten Formteilen konnte somit eine Machbarkeit von der Prüfung bis zur Extrapolation der Modelle gezeigt werden.

## 7.2 Ausblick

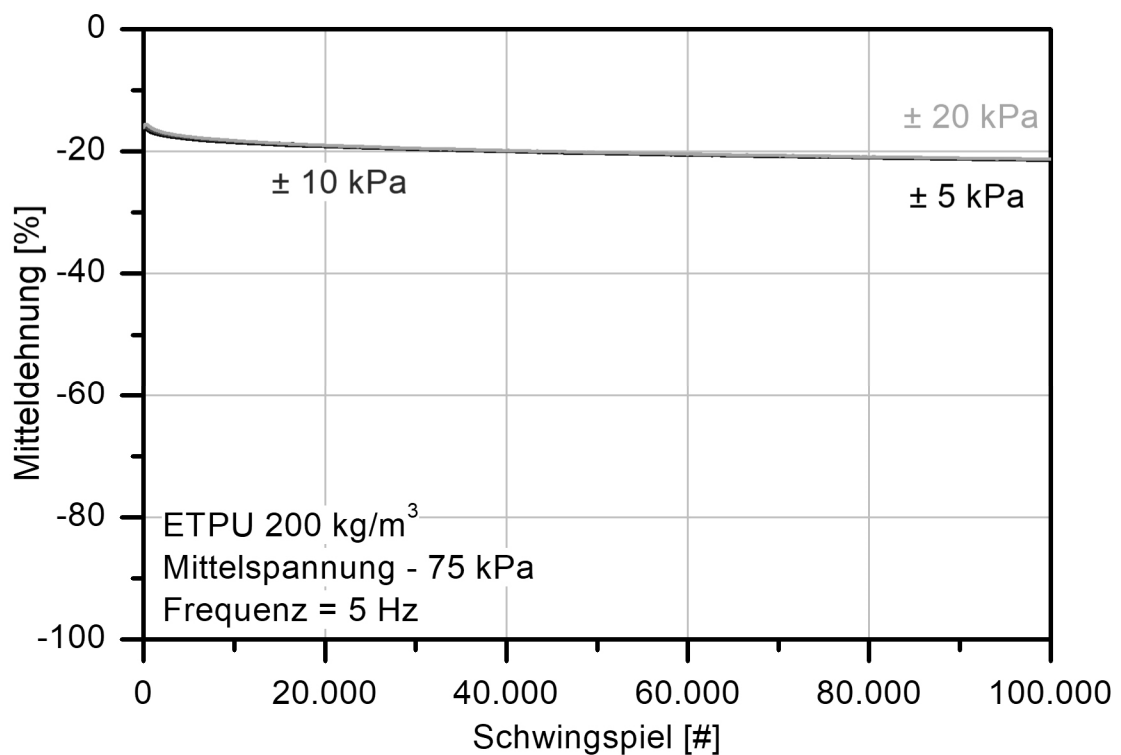
Die vorliegende Arbeit beschränkt sich hinsichtlich der betrachteten Partikelschäume auf EPS und EPP einer gemeinsamen Dichte. Die Entwicklung neuer elastomerer Partikelschäume auf Basis von E-TPU oder E-PEBA stellt ein hochaktives und wirtschaftlich interessantes Forschungsfeld dar. So wird E-TPU oder E-PEBA als Mittelsohle eines Laufschuhs eingesetzt, welche Läufern ein dämpfungsarmes Laufen ermöglichen soll. Die Bestrebungen der Sportler münden z. B. im Brechen von Weltrekorden. Der aktuelle Weltrekord im Marathonlauf beispielsweise beträgt 2:02:57 h und wurde am 28. September 2014 von Dennis Kimetto in einem Adidas®-BOOST™-Schuh aufgestellt [44]. Die Sportartikelhersteller Nike und Adidas arbeiten zurzeit nachweislich an neuen Materialien, die es Marathonläufern ermöglichen sollen, die magische 2-h-Marke eines Marathonlaufes zu unterbieten [45]. Möglich wird dies unter anderem, wenn der Schuh an Gewicht verliert. So kann eine Gewichtseinsparung von 100 g den Sauerstoffverbrauch des Läufers um ca. 1 % verringern [45]. Ferner ist eine Optimierung der antagonistischen Energierückgewinnung als Funktion der Elastizität und der Gelenkschonung als Funktion der Dämpfung für jeden Läufer möglich.

Nicht nur der kurzweilige Einfluss der Materialien auf den Läufer selbst, sondern auch die Vorhersage der Lebensdauer solcher neuen Materialien ist für diese Firmen von äußerstem Interesse. Gezielt die Mitteldehnung oder die Dämpfung beschreibbar zu machen, ist mit den in dieser Arbeit aufgezeigten Methoden möglich. Exemplarische Messungen an E-TPU zeigen bereits ein teilweise anderes Verhalten während einer schwingenden Belastung. Der Einfluss der Variation der Spannungsamplitude auf die Mitteldehnung scheint hier sehr gering zu sein. Dies kann nur durch den elastomeren Charakter des Partikelschaums erklärt werden. Ermüdungsversuche bei der für E-TPU kritischen Mittelspannung  $\sigma_c$  von - 75 kPa und Variation der Spannungsamplitude zeigen den grundsätzlich identischen Verlauf der Mitteldehnung (sh. Abbildung 57). Die gezeigten Mitteldehnungen liegen jedoch vollständig aufeinander, obwohl die Spannungsamplitude zwischen 5 und 20 kPa variiert wird.

Im Hinblick auf die parallele Prüfung von mehreren Probekörpern simultan kann zudem eine Reduzierung der Prüfzeit und somit eine Verkürzung der Entwicklungszeit erwartet werden. Ferner ist der Einfluss des eingeschlossenen Zellgases und der Druck des Gases bei der

Ermüdung noch nicht vollständig aufgedeckt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass dieser Effekt lediglich während der ersten ca. 150.000 Schwingspielen eine Rolle spielt.

Das in der Arbeit aufgezeigte Vorgehen versetzt Wissenschaftler in die Lage, Partikelschäume detailliert zu charakterisieren. Somit ist es nun möglich, unterschiedliche morphologische Elemente gezielt zu variieren und den Einfluss auf die Ermüdung zu bestimmen. Somit könnte der Einfluss z. B. der Dichte, der Zelligkeit, der Temperatur etc. als zukünftiges Forschungsfeld bedient werden.



**Abbildung 57** Ermüdungsversuch von ETPU200 als Funktion der Spannungsamplitude.

## 8 Literaturverzeichnis

1. **Bannasch, Rudolf.** *Technology Guide*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009.
2. **Xin, Hua, Ji, Zhang und Lei, Ming.** „The Bionic Wing with Winglet in Near Space Aerodynamic Analysis“, *Applied Mechanics and Materials* Bde. 644–650 (2014), S. 1939–1942.
3. **de Mestral, Georges.** *Velcro*. 295638, Schweiz, 15.01.1954.
4. **Wolff, Julius.** „Die Lehre von der functionellen Knochengestalt“, *J. Archiv f. pathol. Anat.* Bd. 155, 2 (1899), S. 256–315.
5. **Da Silva, Andre und Kyriakides, Stelios.** „Compressive response and failure of balsa wood“, *International Journal of Solids and Structures* Bd. 44 (2007), S. 25–26.
6. **Weiner, Steve und Wagner, Hanoch Daniel.** „The Material Bone: Structure-Mechanical Function Relations“, *Annual Review of Materials Science* Bd. 28 (1998).
7. **Okrusch, Martin und Matthes, Sigfried.** *Mineralogie*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2005.
8. **Hipke, Thomas, Lange, Günther und Poss, René.** „Leichtbau und Dämpfung vereint“, *Lightweight Des.* Bd. 1, 6 (2008).
9. **Dehn, Frank, König, Gert und Marzahn, Gero.** *Konstruktionswerkstoffe im Bauwesen*. Berlin: Ernst & Sohn, 2003.
10. **Raps, Daniel et al.** „Past and present developments in polymer bead foams and bead foaming technology“, *Polymer* Bd. 56 (2015).
11. **Kaufmann, André.** „Dimensionsanalytische Betrachtung des Kraftstoffverbrauchs zur Abschätzung unterer Grenzen von CO<sub>2</sub>-Emissionen moderner PKW“, *Elektronische Hochschulschriften der Pädagogischen Hochschule Weingarten und der Hochschule Ravensburg Weingarten* (2015).
12. **Gibson, Lorna J. und Ashby, Michael F.** „Cellular Solids“, *Cambridge Solid State Science Series* (1999).

- 
13. **Spörrer, Andreas und Altstädt, Volker.** „Controlling Morphology of Injection Molded Structural Foams by Mold Design and Processing Parameters“, *J. of Cell. Pl.* Bd. 43, (2007), S. 4–5.
14. **Lee, Shau-Tarng.** Introduction. [Buchverf.] S.-T. Lee. *Foam Extrusion – Principles and Practice*. Florida: CRC Press LLC., 2000.
15. **Trassl, Christian, Kunz, Dieter und Altstädt, Volker.** „Kosteneffiziente Herstellung von Sandwichkernen aus Expandiertem Polypropylen (EPP)“, *Verbundwerkstoffe* 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde (ed W. Krenkel), 2009.
16. **BASF SE.** *BASF PlasticsPortal – Schaumstoffe – Neopor*. [Online] [Zitat vom: 16.05.2017] [www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de\\_DE/portal/show/content/products/foams/neopor](http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/portal/show/content/products/foams/neopor).
17. —. *BASF PlasticsPortal – Schaumstoffe – Neopolen P*. [Online] [Zitat vom: 03.11.2017] [https://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de\\_DE/portal/show/content/products/foams/neopolen\\_p](https://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/portal/show/content/products/foams/neopolen_p).
18. —. *BASF PlasticsPortal – Schaumstoffe – ETPU*. [Online] [Zitat vom: 03.11.2017] <https://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU/portal/show/common/content/campaigns/infinergy/deutsch/index.html>.
19. —. BASF's CustomerMagazine *Plastics*. [Online] 02 2007. [Zitat vom: 11.03.2017] [www.basf.de/basf/html/d/produkte/kstoffe/plastics/archiv/a2007-02/maerkte\\_produkte/inhalt\\_627.htm](http://www.basf.de/basf/html/d/produkte/kstoffe/plastics/archiv/a2007-02/maerkte_produkte/inhalt_627.htm).
20. **Aßmann, Dr. Jens.** [Online] [Zitat vom: 11.03.2017] [https://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de\\_DE/portal/show/common/plasticsportal\\_news/2010/10\\_295](https://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/portal/show/common/plasticsportal_news/2010/10_295).
21. **EPP-Forum e.V.** *Partikelschaumherstellung*. [Online] [Zitat vom: 04.08.2014] [www.epp-forum.com](http://www.epp-forum.com).
22. **Ageorges, Christophe, Ye, Lin und Hou, Meng.** „Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: A review“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Bd. 32, 1 (2001).



- 
23. **Gensel, Julia, Altstädt, Volker und Pawelski, Christin.** „Welding quality in polymer bead foams: in situ SEM study“, *Proceedings of Polymer Processing Society Conference PPS 32 Lyon*. (2016).
24. **Horvath, John S.** *Mathematical Modeling of the Stress-Strain-Time Behavior of Geosynthetics Using the Findley Equation: General Theory and Application to EPS-Block Geofoam*. New York: Manhattan College, 1998.
25. **Findley, William N., Lai, James S. und Onaran, Kasif.** *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic material*. USA: North-Holland, 1976.
26. **Krollmann, Norbert.** „Verhalten von EPS-Hartschaumstoffen unter langzeitiger Druckbeanspruchung“, *Bauphysik* Bd. 28, 3 (2006), S. 184–191.
27. **Koczyk, Siegfried.** „Lineare Viskoelastizität in differentieller Darstellung“, *Technische Mechanik* Bd. 17, 2 (1997).
28. **Di Landro, Luca, Sala, Giuseppe und Olivieri, Daniela.** „Deformation mechanisms and energy absorption of polystyrene foams for protective helmets“, *Polymer Testing* Bd. 21 (2002).
29. **Bouix, Rémy, Viot, Philippe und Lataillade, Jean-Luc.** „Polypropylene foam behaviour under dynamic loading: Strain rate, density and microstructure effects“, *International Journal of Impact Engineering* Bd. 36, 2 (2009).
30. **Öztürk, Uhmud Esad und Anlas, Gunay.** „Energy absorption calculations in multiple compressive loading of polymeric foams“, *Materials and Design* Bd. 30 (2009), S. 15-22.
31. **Guittou, Erwan, Rio, Gérard und Laurent, Herve.** „A new multiaxial loading test for investigating the mechanical behaviour of polymers“, *Polymer Testing* Bd. 36 (2014).
32. **Tschoegl, Nicholas W.** *The Phenomenological Theory of Linear Viscoelastic Behavior – An Introduction*. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
33. **Menges, Georg et al.** *Menges Werkstoffkunde Kunststoffe*. München: Carl Hanser Verlag, 2011.
34. **Lazan, Benjamin Joseph.** *Damping of materials and members in structural mechanics*. s. l.: Pergamon Press, 1968.

- 
35. **Thielen, Marc, Speck, Thomas und Seidel, Robin.** „Viscoelasticity and compaction behaviour of the foam-like pomelo (*Citrus maxima*) peel“. *Journal of Material Science* Bd. 48, 9 (2013).
36. **Deckmann, Horst und Mucha, Herbert.** „Messtechnik aus der Forschung in die Praxis“, *KGK Rubberpoint* (2013).
37. **El Fray, Mirosława und Altstädt, Volker.** „Fatigue behaviour of multiblock thermoplastic elastomers. 1. Stepwise increasing load testing of poly(aliphatic/aromatic-ester) copolymers“, *Polymer* Bd. 44 (2003).
38. **Puskás, Judit E. et al.** „Dynamic stress relaxation of thermoplastic elastomeric biomaterials“, *Polymer* Bd. 50 (2009).
39. **N. N.** „Kunststoffe – Normklimate für Konditionierung und Prüfung“, *DIN EN ISO 291:2008-08*. 2008.
40. **Schossig, Marcus.** „Dauerschwingbeanspruchung“, *wiki.polymerservice-merseburg*. [Online] [Zitat vom: 11.06.2017] <http://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php?title=Datei:Dauerschwingbeanspruchung.jpg>.
41. **IST Instron Structural Testing Systems.** Labtronic 8400 Controller. 2004. IST0009 CE.
42. **Nyquist, Harry.** „Certain Topics in Telegraph Transmission Theory“, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* Bd. 47 (1928).
43. **Shannon, Claude E.** „Communication in the Presence of Noise“, *Proc. IRE* Bd. 37, 1 (1949).
44. **Livia.** [www.sports-insider.de](http://www.sports-insider.de). [Online] Ace Ventures GmbH. [Zitat vom: 11.05.2017] [www.sports-insider.de/14797/](http://www.sports-insider.de/14797/).
45. **Weber, Urs.** ISPO. [Online] Messe München GmbH. [Zitat vom: 11.05.2017] [www.ispo.com/people/id\\_79706252/](http://www.ispo.com/people/id_79706252/).

## 9 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1** Demonstrator des Lehrstuhls aus EPS.
- Abbildung 2** Morphologie eines Schaumpartikels aus EPS (Querschnitt aus einer REM-Aufnahme).
- Abbildung 3** Dichten kommerzieller Partikelschäume im Vergleich zu XPS.
- Abbildung 4** Schematischer Ablauf der Formteilherstellung [21].
- Abbildung 5** Interdiffusion von Polymerketten zwischen zwei Schaumpartikeln nach [22].
- Abbildung 6** Mikromechanische Deformationsphänomene nach Gibson und Ashby [12].
- Abbildung 7** Kriechkurven von EPS mit  $20 \text{ kg/m}^3$  in Abhängigkeit der Druckspannung (in Anlehnung an [24]).
- Abbildung 8** Sherby-Dorn Diagramm zur Illustration der unterschiedlichen Kriechmodi (in Anlehnung an [24]).
- Abbildung 9** Kriechkurven für EPS  $34 \text{ kg/m}^3$  bei höherer Druckbelastung (in Anlehnung an [26]).
- Abbildung 10** Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Partikelschäumen (in Anlehnung an [28]).
- Abbildung 11** Spannungs-Dehnungs-Diagramm zweier EPP-Partikelschäume als Funktion der Belastungsgeschwindigkeit [29].
- Abbildung 12** Einfluss der Dichte auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von EPP bei konstanter Belastungsgeschwindigkeit [29].
- Abbildung 13** Spannungs-Dehnungs-Verhalten von EPS 30 im Laststeigerungsversuch mit Entlastung auf den Startpunkt [30].
- Abbildung 14** Quasi-statisches Ermüdungsverhalten von kompaktem EPP aus [31].
- Abbildung 15** Grafische Unterscheidung zwischen Zug- und Druckversuch.
- Abbildung 16** a) Zeitlicher Verlauf der Spannung und Dehnung (schematisch). b) Hysteresiskurve mit Konstruktion der Mittenkurve (schematisch) [34].
- Abbildung 17** Graphischer Abriss der Arbeit.
- Abbildung 18** Probenhalter mit Aufnahmen zur Prüfung von bis zu fünf Proben gleichzeitig.
- Abbildung 19** Prüfdauer als Funktion der Prüfgeschwindigkeit.

- 
- Abbildung 20** Prüfaufbau zur Ermittlung der Ermüdungseigenschaften der Partikelschäume.
- Abbildung 21** Lastbereiche der Ermüdungsprüfung [40].
- Abbildung 22** Gewählte Mittelspannungen für die Ermüdungsprüfung EPS.
- Abbildung 23** Gewählte Spannungsamplituden für die Ermüdungsprüfung von EPS.
- Abbildung 24** Gewählte Mittelspannungen für die dynamische Ermüdung von EPP.
- Abbildung 25** Gewählte Spannungsamplituden für die Ermüdungsprüfung von EPP.
- Abbildung 26** Lineares (links) und nichtlineares (rechts) viskoelastisches Materialverhalten (schematisch).
- Abbildung 27** Querschnitt der Partikelschäume im REM. Oben: EPS30. Unten: EPP30.
- Abbildung 28** Mitteldehnung von EPS30 als Funktion der Anzahl gleichzeitig gemessener Prüfkörper.
- Abbildung 29** Hysteresisschleifen von EPS30 als Funktion der gleichzeitig geprüften Prüfkörper.
- Abbildung 30** Quasi-statisches Verhalten von EPS30 (schwarz) und EPP30 (orange).
- Abbildung 31** Spannungs-Dehnungs-Verhalten von EPS als Funktion der Kantenlänge.
- Abbildung 32** Kraft als Funktion des Querschnitts von EPS30.
- Abbildung 33** Spannungs-Dehnungs-Kurve von EPS als Funktion der Prüfgeschwindigkeit.
- Abbildung 34** Spannungs-Dehnungs-Kurve von EPP als Funktion der Prüfgeschwindigkeit.
- Abbildung 35** Spannung als Funktion der Prüfgeschwindigkeit.
- Abbildung 36** Druckverformungsrest von EPS und EPP als Funktion der Geschwindigkeit.
- Abbildung 37** Zyklisches Deformationsverhalten von EPS und EPP.
- Abbildung 38** Speicher- und Verlustarbeit als Funktion der Belastungszyklen.
- Abbildung 39** Quasi-statisches Dämpfungsvermögen von EPS30 und EPP30 als Funktion der Prüfzyklen unter konstanten Belastungsbedingungen.
- Abbildung 40** Kritische Spannung von EPS und EPP.
- Abbildung 41** Hysteresisschleifen von EPS30 und EPP30 bei kritischer Spannung.
- Abbildung 42** Formänderung der Hysteresisschleifen von EPS30.
- Abbildung 43** Dynamische Steifigkeiten der Mittenkurve von EPS30.
- Abbildung 44** Dynamische Steifigkeiten der Mittenkurve von EPP30.
- Abbildung 45** Dämpfung [%] als Funktion der Schwingspiele.
- Abbildung 46** Mitteldehnung [%] von EPS als Funktion der Mittelspannung.

- 
- Abbildung 47** Mitteldehnung [%] von EPS als Funktion der Spannungsamplitude.
- Abbildung 48** Mitteldehnung von EPP als Funktion der Mittelspannung bei konstanter Spannungsamplitude.
- Abbildung 49** Mitteldehnung von EPP30 als Funktion der Spannungsamplitude.
- Abbildung 50** Übergang des Kriechmodus von I nach II.
- Abbildung 51** Modellmäßige Beschreibung der Mitteldehnung von EPS30.
- Abbildung 52** Mitteldehnung von EPS30 als Funktion der Eingabemenge.
- Abbildung 53** Modellvorstellung und Einzelkomponenten der Modellvorhersage.
- Abbildung 54** Vorhersage der Modellkoeffizienten „Amplitude“ für EPS30.
- Abbildung 55** Vorhersage der Modellkoeffizienten "Zeitkonstante" für EPS30.
- Abbildung 56** Vorhersage der Mitteldehnung von EPS30.
- Abbildung 57** Ermüdungsversuch von ETPU200 als Funktion der Spannungsamplitude.

## 10 Anhang A: Auswerteroutine in Matlab

```
%Programm for reading Hysteresis files from Zwick
%28.04.2015 Angelegt JHK
%Folgende Funktionen muss es erfüllen
%a) Einlesen von CSV
%b) Detektieren der Zyklen anhand der "Zyklusnummer"
%c) Glätten der einzelnen Kurven mit z. B. 16 Hz als Abfrage
%d) exportieren der Hysteresiskurven in einer CSV? Spalte 2*n-1 Weg n
(%)
%Spalte 2n (MPa)

close all;
clear all;

var_grenzfrequenz = 32;
var_anzahl_pi = 1;
%a) Einlesen der CSV mittels Dialog
[file,path]=uigetfile('*.csv','Chose the Hysteresis Data from Zwick
xls-File','');
if isequal(file,0)
    break;
else
    try
    var_data = csvread([path,file],0,0); %einlesen der csvdatei.
    %Datei ist eingelesen.
    %b zyklusnummer detektieren. Muss in Spalte 1 stehen
        i=1;
    bool_zyklus_found = false;
        while bool_zyklus_found == false
    if var_data(i,1) > 0
        % Zahl und startpunkt ist gefunden
        bool_zyklus_found = true;
        var_start_zeile = i;
        var_start_zyklus = var_data(i,1);
    else
        %keine Zahl und muss weiter suchen
    end
        i=i+1;
    end
    var_global_grenzen(1,1) = var_start_zeile;
    var_global_grenzen(1,3) = var_start_zyklus;
        %start bekannt => ziel f,rvar_start_zyklus finden
    var_counter = var_start_zeile;
        while var_counter < size(var_data,1)
    %es wird gnadenlos weitergezählt
        if var_data(var_counter,1) == var_start_zyklus;
    %es ist der selbe zyklus
        %passiert nix nur hochzählen
    else
        %es ist ein neuer zyklus
    var_dim_grenzen = size(var_global_grenzen);
        %altes ziel abspeichern
```

---

```

var_global_grenzen(var_dim_grenzen(1),2)= var_counter -1;

                %neues start abspeichern
var_global_grenzen(var_dim_grenzen(1)+1,1)= var_counter;

var_start_zyklus = var_data(var_counter,1);
var_global_grenzen(var_dim_grenzen(1)+1,3) = var_start_zyklus;

end
var_counter = var_counter +1;
end
                %alle gefunden und nun den letzten abspeichern
var_global_grenzen(var_dim_grenzen(1)+1,2)= var_counter;
catch exeption
%Error in file read
msgbox('File could not be opened. Aborting!');
    break;
end
    %c ) Splitten der Daten in strukturen =)
for k = 1 : length(var_global_grenzen)
var_weg{1,k}                                     =
var_data(var_global_grenzen(k,1):var_global_grenzen(k,2),3);
var_kraft{1,k}                                   =
var_data(var_global_grenzen(k,1):var_global_grenzen(k,2),4);
var_weg_temp = var_weg{1,k};
var_kraft_temp = var_kraft{1,k};
%Filter definieren
var_intervalllaenge = 2*length(var_weg_temp);
iN = var_intervalllaenge/var_grenzfrequenz; % Länge des Filters
iN = iN/2;
    [B,A] = butter(3,1/iN);
%Flter anwenden
var_weg_temp = filtfilt(B,A , var_weg_temp);
var_kraft_temp = filtfilt(B,A , var_kraft_temp);

    %R ckholen der struct und neu abspeichern in selber struct. Damit
    %sind alle messwerte beisammen.
var_weg{2,k} = var_weg_temp;
var_kraft{2,k} = var_kraft_temp;
k = k+1;
end
%Export
%Path dialog
path = uigetdir(path,'Choose Path for saving Hysteresis Curves');
path = [path '/'];

    for j = 1 : length(var_weg)
        filename = sprintf('%s_Filtered_Curve_%i.csv' ,file(1:end-
4),var_global_grenzen(j,3));
        % filtered
var_weg_temp = var_weg{2,j};
var_kraft_temp = var_kraft{2,j};

csvwrite([path,filename], [var_weg_tempvar_kraft_temp]);

```

---

```
        filename = sprintf('%s_UNfiltered_Curve_%i.csv' ,file(1:end-
4),var_global_grenzen(j,3));
% filtered
var_weg_temp = var_weg{1,j};
var_kraft_temp = var_kraft{1,j};
csvwrite([path,filename], [var_weg_tempvar_kraft_temp]);

    end
end
%Programm-Ende
```



# Publikationen

## Begutachtete Publikationen:

- Jan-Hendrik Keller, Volker Altstädt, *Influence of mid-stress on the dynamic fatigue of a light weight EPS bead foam*, e-Polymers Vol. 19 No. 1, 2019
- A Fathi, JH Keller, V Altstaedt, *Full-field shear analyses of sandwich core materials using Digital Image Correlation (DIC)*, Composites Part B: Engineering, 2015
- Cestari, Sibeled Piedade; Mendes, Luis Claudio; Altstädt, Volker; Mano, Eloisa Biasotto; da Silva, Daniela França, Keller, Jan-Hendrik, *Crystallization Kinetics of Recycled High Density Polyethylene and Coffee Dregs Composites*, - Polymers & Polymer Composites, 2014
- Sibeled Piedade Cestari; Luis Claudio Mendes; Daniela França da Silva; Jorge Pereira Chimanowsky Jr.; Volker Altstädt; Vitaly Demchuk; Anneliese Lang; Rodrigo Gheno Leonhardt; Jan-Hendrik Keller, *Properties of recycled high density polyethylene and coffee dregs composites*, Polímeros Vol. 23 No.6, 2013